思考题

2-3 区别变压器的主磁通和漏磁通，并指出激磁各磁通的磁动势。

答：主磁通同时交链一、二次绕组，磁路沿铁芯闭合，磁阻小，磁通密度大，磁路易饱和，与激磁电流呈非线性；漏磁通只和自身绕组交链，磁路所经路径大部分为非磁性材料，磁阻大，磁通密度小，磁路不饱和，与绕组中的电流呈线性。主磁通通过电磁感应传递功率；漏磁通只产生漏阻抗压降。

主磁通由一、二次磁动势共同产生；一次漏磁通由一次磁动势励磁，二次漏磁通由二次磁动势励磁。

2-4 在作变压器的等效电路时，励磁回路中的 r_m 代表什么电阻？这一电阻能否用直流电表来测量？

答：r_m 是表示变压器铁芯损耗的等效电阻，即是用来计算变压器铁芯损耗的模拟电阻，它并非实质电阻，故不能用直流电表来测量。

2-5 变压器中的励磁电抗 x_m 的物理意义是什么？在变压器中希望 x_m 大好，还是小好？

答：变压器的励磁电抗 x_m 是与主磁通对应的感抗，它反应了变压器铁芯的磁化能力。变压器中希望 x_m 大好，说明变压器铁芯的磁导率很大，所需的励磁电流小。

2-6 压器一次电压超过额定电压时，其励磁电流 I_m、励磁电阻 r_m、励磁电抗 x_m 和铁耗 p_{Fe} 将如何变化？

答：由 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 可知，电压增大，Φ_m 增大，励磁磁动势 $N_1 I_m$ 增大，励磁电流 I_m 增大；Φ_m 增大，铁耗 $p_{Fe} \propto B_m^2$，p_{Fe} 增大；Φ_m 增大，磁路饱和程度上升，x_m 减小；由于磁路饱和，I_m 增加的幅度比 B_m 增加的幅度大，由 $r_m = \dfrac{p_{Fe}}{I_m^2}$ 可知，r_m 减小。

励磁电流 I_m 增大；励磁电阻 r_m 减小；励磁电抗 x_m 减小；铁耗 p_{Fe} 增大。

2-7 如将频率 $f = 50\text{Hz}$ 的变压器，用于频率 $f = 60\text{Hz}$ 的电源上（电压相同），问励磁电流 I_m、励磁电阻 r_m、励磁电抗 x_m、短路电抗 x_k 和铁耗 p_{Fe} 将如何变化？

答：由 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 可知，频率 f 增大，Φ_m 减小，励磁磁动势 $N_1 I_m$ 减小，励磁电流 I_m 减小；Φ_m 减小，饱和度减小，频率上升，励磁电抗 x_m 增加；铁耗 $p_{Fe} \propto f^{1.3} B_m^2$，$p_{Fe}$ 减小；p_{Fe} 减小的幅度比 I_m^2 减小的幅度小，由 $r_m = \dfrac{p_{Fe}}{I_m^2}$ 可知，r_m 增大；由于漏磁磁阻线性，频率增大，一、二次绕组漏抗增大，短路电抗 x_k 增加。

励磁电流 I_m 减小；励磁电阻 r_m 增大；励磁电抗 x_m 增加；短路电抗 x_k 增加；铁耗 p_{Fe} 减小。

2-13 试写出当变压器供给的负载电流的负载系数为 β 时的电压变化实用公式。

答：$\Delta U\% = [\beta(u_{a*}\cos\theta_2 + u_{r*}\sin\theta_2) + \dfrac{1}{2}\beta^2(u_{a*}\cos\theta_2 - u_{r*}\sin\theta_2)^2]\times 100\%$

简化为：$\Delta U\% = \beta(u_{a*}\cos\theta_2 + u_{r*}\sin\theta_2)\times 100\%$

习题：

2-3

解：

（1）$I_{1NL} = I_{1N} = \dfrac{S_N}{\sqrt{3U_{1N}}} = \dfrac{500\times 10^3}{\sqrt{3}\times 10000} = 28.9\text{A}$

$$I_{1Nph} = \frac{I_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{28.9}{\sqrt{3}} = 16.7\text{A}$$

$$I_{2Nph}=I_{2NL}=I_{2N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{500\times10^3}{\sqrt{3}\times400}=721.7A$$

（2）

$$k=\frac{U_{1Nph}}{U_{2Nph}}=\frac{U_{1N}}{U_{2N}/\sqrt{3}}=\frac{10000}{400/\sqrt{3}}=43.3$$

$$N_2=\frac{N_1}{43.3}=\frac{960}{43.3}\approx22$$

$$E_t=\frac{U_{2N}}{\sqrt{3}N_2}=\frac{400}{\sqrt{3}\times22}=10.5V$$

（3）

$$A_{Fe}=\frac{E_1}{4.44fN_1B_m}\approx\frac{U_1}{4.44fN_1B_m}=\frac{U_{1N}}{4.44fN_1B_m}=\frac{10000}{4.44\times50\times960\times1.4}=0.0335m^2$$

（4）

$$A_{cu1}=\frac{I_{1N}}{J}=\frac{16.7}{3}=5.57mm^2$$

$$A_{cu2}=\frac{I_{2N}}{J}=\frac{721.7}{3}=240.6mm^2$$

2-8

解：法一

（1）$I_{1N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{320\times10^3}{\sqrt{3}\times6300}$=29.3A， $I_{2N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{320\times10^3}{\sqrt{3}\times400}$=461.9A

$$k=\frac{U_{1Nph}}{U_{2Nph}}=\frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{U_{2N}}=\frac{6300/\sqrt{3}}{400}=9.1$$

$$Z_{m(低)}=\frac{U_{20ph}}{I_{20ph}}=\frac{U_{20}}{I_{20L}/\sqrt{3}}=\frac{400}{27.7/\sqrt{3}}=25.01\Omega$$

$$r_{m(低)}=\frac{p_{20}/3}{I_{20ph}^2}=\frac{p_{20}/3}{(I_{20L}/\sqrt{3})^2}=\frac{1.45\times10^3}{(27.7)^2}=1.89\Omega$$

$$x_{m(低)}=\sqrt{Z_{m(低)}^2-r_{m(低)}^2}=\sqrt{25.01^2-1.89^2}=24.94\Omega$$

$$Z_{2b}=\frac{U_{2Nph}}{I_{2Nph}}=\frac{U_{2N}}{I_{2N}/\sqrt{3}}=\frac{400}{461.9/\sqrt{3}}=1.5\Omega$$

$Z_{m*}=\frac{Z_{m(低)}}{Z_{2b}}=\frac{25.01}{1.5}=16.67$； $r_{m*}=\frac{r_{m(低)}}{Z_{2b}}=\frac{1.89}{1.5}=1.26$； $x_{m*}=\frac{x_{m(低)}}{Z_{2b}}=\frac{24.94}{1.5}=16.62$

$$Z_k=\frac{U_{1kph}}{I_{1kph}}=\frac{U_{1kL}/\sqrt{3}}{I_{1k}}=\frac{284/\sqrt{3}}{29.3}=5.6\Omega$$

$$r_k=\frac{p_{1k}/3}{I_{1kph}^2}=\frac{p_{1k}/3}{I_{1k}^2}=\frac{5.7\times10^3/3}{29.3^2}=2.21\Omega$$

$$x_k=\sqrt{Z_k^2-r_k^2}=\sqrt{5.6^2-2.21^2}=5.15\Omega$$

$$Z_{1b}=\frac{U_{1Nph}}{I_{1Nph}}=\frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{I_{1N}}=\frac{6300/\sqrt{3}}{29.3}=124.14\Omega$$

$Z_{k*}=\frac{Z_k}{Z_{1b}}=\frac{5.6}{124.14}=0.0451$； $r_{k*}=\frac{r_k}{Z_{1b}}=\frac{2.21}{124.14}=0.0178$； $x_{k*}=\frac{x_k}{Z_{2b}}=\frac{5.15}{124.14}=0.0415$

（2）设每相负载电阻为 r_{LY} ，则 $r_{L\Delta}=3r_{LY}$

$$\frac{U_{1Nph}}{I_{1Nph}}=\frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{I_{1N}}=\sqrt{(r_k+3k^2r_{LY})^2+x_k^2}$$

得： $\frac{6300/\sqrt{3}}{29.3}=\sqrt{(2.21+3\times9.1^2\times r_{LY})^2+5.15^2}$

解之得： $r_{LY}=0.49\Omega$

法二

（1） $I_{1N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{320\times10^3}{\sqrt{3}\times6300}$=29.3A ， $I_{2N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{320\times10^3}{\sqrt{3}\times400}$=461.9A

空载时： $U_{20*}=1$， $I_{20*}=\frac{I_{20}}{I_{2N}}=\frac{27.7}{461.9}=0.06$， $p_{20*}=\frac{p_{20}}{S_N}=\frac{1.45}{320}=0.00453$

$Z_{m*}=\frac{U_{20*}}{I_{20*}}=\frac{1}{0.06}=16.67$， $r_{m*}=\frac{p_{20*}}{I_{20*}^2}=\frac{0.00453}{0.06^2}=1.258$

$x_{m*}=\sqrt{Z_{m*}^2-r_{m*}^2}=\sqrt{16.67^2-1.258^2}=16.62$

短路时： $I_{1k*}=1$， $U_{1k*}=\frac{U_{1k}}{U_{2N}}=\frac{284}{6300}=0.0451$， $p_{1k*}=\frac{p_{1k}}{S_N}=\frac{5.7}{320}=0.0178$

$Z_{k*}=\frac{U_{1k*}}{I_{1k*}}=\frac{0.0451}{1}=0.0451$， $r_{k*}=\frac{p_{1k*}}{I_{1k*}^2}=\frac{0.0178}{1^2}=0.0178$

$x_{k*}=\sqrt{Z_k^{*2}-r_{k*}^2}=\sqrt{0.0451^2-0.0178^2}=0.0414$

（2） $U_{1*}=1$， $I_{1*}=I_{2*}=1$， $\frac{U_{1*}}{I_{1*}}=1=\sqrt{(r_{k*}+r_{L\Delta*})^2+x_{k*}^2}=\sqrt{(0.0178+r_{L\Delta*})^2+0.0414^2}$

解之得： $r_{L\Delta*}=0.9813\Omega$

$Z_{2b}=\frac{U_{2Nph}}{I_{2Nph}}=\frac{U_{2N}}{I_{2N}/\sqrt{3}}=\frac{400}{461.9/\sqrt{3}}=1.5\Omega$

$r_{L\Delta}=r_{L*}\times Z_{2b}=0.9813\times1.5=1.472\Omega$

$r_{LY}=\frac{r_{L\Delta}}{3}=\frac{1.472}{3}=0.49\Omega$

2-9

解：法一

（1） $I_{1N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{125000}{\sqrt{3}\times110}$=656.1A ， $I_{2N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{125000}{\sqrt{3}\times11}$=6561A

$$k=\frac{U_{1Nph}}{U_{2Nph}}=\frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{U_{2N}}=\frac{110/\sqrt{3}}{11}=5.8$$

$$Z_{m(低)}=\frac{U_{20ph}}{I_{20ph}}=\frac{U_{20}}{I_{20L}/\sqrt{3}}=\frac{11000}{0.02\times6561/\sqrt{3}}=145.19\Omega$$

$$r_{m(低)}=\frac{p_{20}/3}{I_{20ph}^2}=\frac{p_{20}/3}{(I_{20L}/\sqrt{3})^2}=\frac{133\times10^3}{(0.02\times6561)^2}=7.72\Omega$$

$$x_{m(低)}=\sqrt{Z_{m(低)}^2-r_{m(低)}^2}=\sqrt{145.19^2-7.72^2}=144.98\Omega$$

$$Z_{2b}=\frac{U_{2Nph}}{I_{2Nph}}=\frac{U_{2N}}{I_{2N}/\sqrt{3}}=\frac{11000}{6561/\sqrt{3}}=2.9\Omega$$

$$Z_{m*}=\frac{Z_{m(低)}}{Z_{2b}}=\frac{145.19}{2.9}=50.07\text{；}\ r_{m*}=\frac{r_{m(低)}}{Z_{2b}}=\frac{7.72}{2.9}=2.66\text{；}\ x_{m*}=\frac{x_{m(低)}}{Z_{2b}}=\frac{144.98}{2.9}=49.99$$

$$Z_k=\frac{U_{1kph}}{I_{1kph}}=\frac{U_{1kL}/\sqrt{3}}{I_{1k}}=\frac{0.105\times110000/\sqrt{3}}{656.1}=10.16\Omega$$

$$r_k=\frac{p_{1k}/3}{I_{1kph}^2}=\frac{p_{1k}/3}{I_{1k}^2}=\frac{600\times10^3/3}{656.1^2}=0.46\Omega$$

$$x_k=\sqrt{Z_k^2-r_k^2}=\sqrt{10.16^2-0.46^2}=10.15\Omega$$

$$Z_{1b}=\frac{U_{1Nph}}{I_{1Nph}}=\frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{I_{1N}}=\frac{110000/\sqrt{3}}{656.1}=96.8\Omega$$

$$Z_{k*}=\frac{Z_k}{Z_{1b}}=\frac{10.16}{96.8}=0.105\text{；}\ r_{k*}=\frac{r_k}{Z_{1b}}=\frac{0.46}{96.8}=0.0048\text{；}\ x_{k*}=\frac{x_k}{Z_{2b}}=\frac{10.15}{96.8}=0.1049$$

（2）设$\dot{U}_2'=kU_{2Nph}\angle0°$，则$\dot{I}_2'=\dfrac{I_{2Nph}}{k}\angle-36.87°$

$$\dot{U}_1=\dot{U}_2'+\dot{I}_2'Z_k=kU_{2Nph}\angle0°+\frac{I_{2Nph}}{k}\angle-36.87°\cdot(r_k+jx_k)$$

$$=\frac{110/\sqrt{3}}{11}\times11\times10^3\angle0°+\frac{6561}{\sqrt{3}}\times\frac{11}{110/\sqrt{3}}\angle-36.87°\cdot(0.46+j10.15)$$

$$=63.51\times10^3\angle0°+656.1\angle-36.87°\cdot10.16\angle87.41°$$

$$=63.51\times10^3\angle0°+6.67\times10^3\angle50.54°$$

$$=67.75\times10^3+j5.15\times10^3$$

$$=67.95\times10^3\angle4.4°$$

$$U_{1L}=\sqrt{3}\times67.95=117.69\text{kV}$$

$$\dot{I}_1=\dot{I}_2'+\frac{\dot{U}_1}{Z_m}=656.1\angle-36.87°+\frac{67.95\times10^3\angle4.4°}{5.8^2(7.72+j144.98)}$$

$$=656.1\angle-36.87°+\frac{67.95\times10^3\angle4.4°}{5.8^2\times145.19\angle86.95°}$$

$$=656.1\angle-36.87°+13.91\angle-82.55°$$

$$=526.68-j407.45=665.89\angle\text{-}37.72°$$

$$I_{1L}=665.89\text{A}$$

（3）

$$\Delta U\%=\frac{U_1-U_2'}{U_1}\times100\%=\frac{67.95-63.51}{67.95}\times100\%=6.53\%$$

$$\Delta U\%=\frac{U_1-U_2'}{U_{1N}}\times100\%=\frac{67.95-63.51}{63.51}\times100\%=6.99\%$$

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}\times100\%=\frac{\sqrt{3}\times11\times6561\times\cos36.87°}{\sqrt{3}\times117.69\times665.89\times\cos(37.72°+4.4°)}\times100\%=99.32\%$$

$$\Delta U\% = \beta(u_{a*}\cos\theta_2 + u_{r*}\sin\theta_2)\times 100\%$$
$$= 1\cdot(0.0048\cos 36.87 + 0.1049\sin 36.87)\times 100\% = 6.67\%$$
$$\eta = \frac{\beta S_N \cos\theta_2}{\beta S_N\cos\theta_2 + \beta^2 p_{kN} + p_0}\times 100\% = \frac{125000\times 0.8}{125000\times 0.8 + 600 + 133}\times 100\% = 99.27\%$$
（4）
$$\beta = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}} = \sqrt{\frac{133}{600}} = 0.4708$$
$$\eta = \frac{\beta S_N\cos\theta_2}{\beta S_N\cos\theta_2 + 2p_0}\times 100\% = \frac{0.4708\times 125000\times 0.8}{0.4708\times 125000\times 0.8 + 2\times 133}\times 100\% = 99.44\%$$

法二

（1） $I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{125000}{\sqrt{3}\times 110}$=656.1A， $I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{125000}{\sqrt{3}\times 11}$=6561A

空载时： $U_{20*} = 1$， $I_{20*} = \frac{I_{20}}{I_{2N}} = 0.02$， $p_{20*} = \frac{p_{20}}{S_N} = \frac{133}{125000} = 0.001064$

$Z_{m*} = \frac{U_{20*}}{I_{20*}} = \frac{1}{0.02} = 50$， $r_{m*} = \frac{p_{20*}}{I_{20*}^2} = \frac{0.001064}{0.02^2} = 2.66$

$x_{m*} = \sqrt{Z_{m*}^2 - r_{m*}^2} = \sqrt{50^2 - 2.66^2} = 49.93$

短路时： $I_{1k*} = 1$， $U_{1k*} = 0.105$， $p_{1k*} = \frac{p_{1k}}{S_N} = \frac{600}{125000} = 0.0048$

$Z_{k*} = \frac{U_{1k*}}{I_{1k*}} = \frac{0.105}{1} = 0.105$， $r_{k*} = \frac{p_{1k*}}{I_{1k*}^2} = \frac{0.048}{1^2} = 0.048$

$x_{k*} = \sqrt{Z_k^{*2} - r_{k*}^2} = \sqrt{0.105^2 - 0.0048^2} = 0.1049$

（2）设 $\dot{U}_{2*} = 1\angle 0°$，则 $\dot{I}_{2*} = 1\angle -36.87°$

$\dot{U}_{1*} = \dot{U}_{2*} + \dot{I}_{2*}Z_{k*} = 1\angle 0° + 1\angle -36.87°\cdot(0.0048 + \mathrm{j}0.1049)$

$= 1 + 1\angle -36.87°\cdot 0.105\angle 87.38°$

$= 1 + 0.105\angle 50.51°$

$= 1.0667 + \mathrm{j}0.081$

$=1.0698\angle 4.36°$

$U_{1L} = 1.0698\times 110 = 117.68\text{kV}$

$\dot{I}_{1*} = \dot{I}_{2*} + \frac{\dot{U}_{1*}}{Z_{m*}} = 1\angle -36.87° + \frac{1.0698\angle 4.36°}{2.66 + \mathrm{j}49.93}$

$= 1\angle -36.87° + \frac{1.0698\angle 4.36°}{50\angle 86.95°}$

$= 1\angle -36.87° + 0.0214\angle -82.59°$

$= 0.8 - \mathrm{j}0.6 + 0.00263 - \mathrm{j}0.0212$

$= 0.80263 - \mathrm{j}0.6212$

$= 1.015\angle -37.74°$

$I_{1L} = 1.015\times 656.1 = 665.94\text{A}$

（3）

$$\Delta U\% = \frac{U_1 - U_2'}{U_1}\times 100\% = \frac{U_{1*} - U_{2*}'}{U_{1*}}\times 100\% = \frac{1.0699 - 1}{1.0699}\times 100\% = 6.53\%$$

$$\Delta U\% = \frac{U_1 - U_2'}{U_{1N}} \times 100\% = (U_{1*} - 1) \times 100\% = 6.99\%$$

$$\eta = \frac{P_{2*}}{P_{1*}} \times 100\% = \frac{U_{2*} I_{2*} \cos 36.87°}{U_{1*} I_{1*} \cos 37.74°} \times 100\%$$

$$= \frac{\cos 36.87°}{1.0699 \times 1.015 \cos(37.74° + 4.36°)} \times 100\% = 99.29\%$$

$$\Delta U\% = \beta(u_{a*} \cos\theta_2 + u_{r*} \sin\theta_2) \times 100\%$$

$$= 1 \cdot (0.0048 \cos 36.87 + 0.1049 \sin 36.87) \times 100\% = 6.67\%$$

$$\eta = \frac{\beta \cos\theta_2}{\beta \cos\theta_2 + \beta^2 p_{kN*} + p_{0*}} \times 100\% = \frac{0.8}{0.8 + 0.0048 + 0.001064} \times 100\% = 99.28\%$$

（4）

$$\beta = \sqrt{\frac{p_{0*}}{p_{kN*}}} = \sqrt{\frac{0.001064}{0.0048}} = 0.4708$$

$$\eta = \frac{\beta \cos\theta_2}{\beta \cos\theta_2 + 2p_{0*}} \times 100\% = \frac{0.4708 \times 0.8}{0.4708 \times 0.8 + 2 \times 0.001048} \times 100\% = 99.44\%$$

补充：

三相变压器100kVA，6000/230V，Yy 连接，$u_k = 5.5\%$，$p_k = 2.4\text{kW}$，二次侧三角形连接三 $P_N = 17\text{kW}$ 相平衡负载，每相负载阻抗 $Z_L = 1.272 + \text{j}0.954\Omega$ 欧，忽略励磁电流。试求负载电流，二次端电压，一次侧功率因数。

解：法一

$$u_k = 5.5\%$$

$$U_{1k} = u_k \times U_{1N} = 0.055 \times 6000 = 330\text{V}$$

$$I_{1k} = I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} = 9.623\text{A}$$

$$Z_k = \frac{U_{1kph}}{I_{1kph}} = \frac{U_{1k}/\sqrt{3}}{I_{1k}} = \frac{330/\sqrt{3}}{9.623} = 19.8\Omega$$

$$r_k = \frac{p_{1k}/3}{I_{1kph}^2} = \frac{p_{1k}/3}{I_{1k}^2} = \frac{2.4 \times 10^3/3}{9.623^2} = 8.64\Omega$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{19.8^2 - 8.64^2} = 17.82\Omega$$

$$k = \frac{U_{1Nph}}{U_{2Nph}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{6000}{230} = 26.1$$

$$Z_{LY} = \frac{Z_{L\Delta}}{3} = \frac{1.272 + \text{j}0.954}{3} = 0.424 + \text{j}0.318\Omega$$

$$Z_{LY}' = k^2 Z_{LY} = 26.1^2 (0.424 + \text{j}0.318) = 288.83 + \text{j}216.62\Omega$$

$$Z = Z_k + Z_{LY}' = 297.47 + \text{j}234.44\Omega$$

$$I_2' = \frac{U_{1Nph}}{|Z|} = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{|Z|} = \frac{6000/\sqrt{3}}{\sqrt{297.47^2 + 234.44^2}} = \frac{6000/\sqrt{3}}{378.75} = 9.15\text{A}$$

$$I_2 = kI_2' = 26.1 \times 9.15 = 238.8\text{A}$$

$$U_2=\sqrt{3}I_2\left|Z_{LY}\right|=\sqrt{3}\times238.8\times\sqrt{0.424^2+0.318^2}=\sqrt{3}\times238.8\times0.53=219.2\text{V}$$

$$\cos\theta_1=\frac{297.47}{378.75}=0.785$$

法二

$$U_{k*}=0.055;\quad I_{k*}=1;\quad p_{k*}=\frac{2.4}{100}=0.024$$

$$Z_{k*}=\frac{U_{1k*}}{I_{1k*}}=0.055;\quad r_{k*}=\frac{p_{1k*}}{I_{1k*}^2}=0.024;\quad x_{k*}=\sqrt{Z_{k*}^2-r_{k*}^2}=\sqrt{0.055^2-0.024^2}=0.05\Omega$$

$$Z_{LY}=\frac{Z_{L\Delta}}{3}=\frac{1.272+\text{j}0.954}{3}=0.424+\text{j}0.318\Omega$$

$$Z_{1b}=\frac{U_{1N}^2}{S_N}=\frac{6000^2}{100\times10^3}=360\Omega;\quad Z_{2b}=\frac{U_{2N}^2}{S_N}=\frac{230^2}{100\times10^3}=0.529\Omega$$

$$Z_{LY*}=\frac{Z_{LY}}{Z_{2b}}=\frac{0.424+\text{j}0.318}{0.529}=0.803+\text{j}0.601$$

$$Z_*=0.827+\text{j}0.651$$

$$I_{2*}=\frac{1}{\left|Z_*\right|}=\frac{1}{1.052}=0.951$$

$$I_{2N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{100\times10^3}{\sqrt{3}\times230}=251\text{A}$$

$$I_2=I_{2*}\times I_{2N}=0.951\times251=238.7\text{A}$$

$$U_2=\sqrt{3}I_2\left|Z_{LY}\right|=\sqrt{3}\times238.8\times\sqrt{0.424^2+0.318^2}=\sqrt{3}\times238.8\times0.53=219.2\text{V}$$

$$\cos\theta_1=\frac{0.827}{1.052}=0.786$$

思考题

9-2 异步电机的主磁路包括哪几部分，为什么定子和转子都要用导磁性能良好的硅钢片制成？

答：异步电机的主磁路包括：气隙、定子齿、定子轭、转子齿和转子轭（空气隙、定子铁芯和转子铁芯）；定子和转子都要用导磁性能良好的硅钢片制成，可以以减小励磁电流并减小铁耗（涡流损耗和磁滞损耗），从而提高电机的效率和功率因数。

9-4 为什么异步电机必须有转差率？如何根据转差率的大小区别各种运行状态？

答：只有存在转差率才能保证转子绕组与气隙磁场之间有相对运动，从而在闭合的转子绕组中产生感应电动势和感应电流，感应电流与气隙磁场相作用产生转矩，实现机电能量转换。

（1）$n > n_1; s < 0$：电机处于发电机运行状态，电磁转矩为制动转矩，将机械能转化为电能，当$|s| < |s_k|$时，$|s|$越大，电磁转矩和负载越大；

（2）$0 \le n < n_1; 0 < s \le 1$：电机处于电动机运行状态，电磁转矩为驱动转矩，将电转化为机械能，当$0 < s < s_k$时，s越大，电磁转矩和负载越大；

（3）$n < 0; 1 < s$：电机处于电磁制动状态，电磁转矩为制动转矩，从轴吸收机械能，同时从电网吸收电能，共同转化为电机损耗，s越大，电磁转矩和负载越大。

9-6 三相异步电动机的转速变化，转子所产生的磁动势在空间的转速是否发生变化？为什么？

答：不会发生变化。转子所产生的磁动势在空间的转速为$\dfrac{60f_2}{p} + n = \dfrac{60sf_1}{p} + n = sn_1 + n = n_1$，即为同步转速，与转子的转速无关。

9-7 当异步电动机运行时，定子电流的频率是多少？转子电流的频率是多少？它们分别是由什么因素决定？

答：定子电流的频率取决于电源的频率，我国为 50Hz；转子电流的频率为$f_2 = \dfrac{p\Delta n}{60} = sf_1$，取决于转子相对于定子旋转磁场的转速和电机的极对数（转差率与定子电源频率）。

9-12 试分析下列情况下异步电机的最大转矩、临界转差率和起动转矩将如何变化？

（1）转子回路中串电阻；

答：T_m与转子回路电阻无关，所以T_m不变；s_k与转子回路电阻成正比，所以s_k变大；由转矩-转差率特性曲线可知，在一定范围内时T_{st}变大。

（2）定子回路中串电阻；

答：由T_m、s_k和T_{st}的表达式可知：T_m变小，s_k变小，T_{st}变小。

（3）降低电源电压；

答：由T_m、s_k和T_{st}的表达式可知：T_m变小，s_k不变，T_{st}变小。

（4）降低电源频率；

答：由T_m、s_k和T_{st}的表达式可知：T_m变大，s_k变大，T_{st}变大。

9-13 为什么三相异步电动机空载运行时，转子侧功率因数$\cos\theta_2$很高，而定子侧功率因数$\cos\theta_1$却很低？为什么额定负载时转子侧功率因数并不很高，而定子侧功率因数比较高？

答：空载时，s很小，接近于 0，由$\cos\theta_2 = \dfrac{\frac{r_2'}{s}}{\sqrt{(\frac{r_2'}{s})^2 + x_2'^2}} = \dfrac{r_2'}{\sqrt{r_2'^2 + (sx_2')^2}}$可知，$\cos\theta_2 \approx 1$，而此时定子电流基本上是励磁电流，为感性无功电流，所以定子侧功率因数很低，约为 0.2；额定负载时，与空载相比，转差率增大，转子侧功率因数有所降低，此时电机输出有功功率，定子中有功电流所占比重较大，因此，定子侧的功率因数较高，约 0.85。

9-14 为什么异步电机无论处于何种运行情况，功率因数总是滞后的？

答：因为异步电机无论处于何种运行情况都需电源向定子提供励磁电流，该电流为感性无功电流，因此功率因数总是滞后的；再从其等效电路可以看出，其等效电路由电感和电阻组成，

其等效阻抗为感性阻抗，其定子电流总是滞后于定子电压，所以其功率因数总是滞后的。

习题：

9-4

解：（1）由 $n_{\mathrm{N}}=1470\mathrm{r/min}$ 和 $s_{\mathrm{N}}=0.02\sim0.06$ 可知： $n_1=1500\mathrm{r/min}$ ； $p=2$

$$s_{\mathrm{N}}=\frac{n_1-n_{\mathrm{N}}}{n_1}=\frac{1500-1457}{1500}=0.0287$$

（2） $P_{1\mathrm{N}}=\dfrac{P_{2\mathrm{N}}}{\eta_{\mathrm{N}}}=\dfrac{90}{0.895}=100.559\mathrm{kW}$

$$I_{1\mathrm{N}}=\frac{P_{1\mathrm{N}}}{\sqrt{3}U_{\mathrm{N}}\cos\theta_{1\mathrm{N}}}=\frac{100.559\times10^3}{\sqrt{3}\times3000\times0.86}=22.5\mathrm{A}$$

$$T_{2\mathrm{N}}=\frac{P_{2\mathrm{N}}}{\dfrac{2\pi n_N}{60}}=\frac{90\times10^3}{\dfrac{2\pi\times1457}{60}}=590\mathrm{N{\bullet}m}$$

（3） $q=\dfrac{Z}{2pm}=\dfrac{48}{4\times3}$=4； $\alpha=\dfrac{p\times360^\circ}{48}=\dfrac{2\times360^\circ}{48}$=15°； $\tau=\dfrac{Z}{2p}=\dfrac{48}{4}$=12；

$\beta=(\tau-y)\alpha=(12-10)\times15^\circ=30^\circ$

定子：

$$K_{\mathrm{p1}}=\cos\frac{\beta}{2}=\cos15^\circ=0.9659$$

$$K_{\mathrm{d1}}=\frac{\sin\dfrac{q\alpha}{2}}{q\sin\dfrac{\alpha}{2}}=\frac{\sin\dfrac{4\times15}{2}}{4\times\sin\dfrac{15}{2}}=0.9577$$

$$K_{\mathrm{N1}}=K_{\mathrm{p1}}K_{\mathrm{d1}}=0.9659\times0.9577=0.925$$

$$N_1=\frac{pqS}{a}=\frac{2\times4\times40}{1}=320$$

转子：

$q=\dfrac{Z}{2pm}=\dfrac{60}{4\times3}$=5； $\alpha=\dfrac{p\times360^\circ}{48}=\dfrac{2\times360^\circ}{60}$=12°； $\tau=\dfrac{Z}{2p}=\dfrac{48}{4}$=12；

$$K_{\mathrm{p2}}=1$$

$$K_{\mathrm{d2}}=\frac{\sin\dfrac{q\alpha}{2}}{q\sin\dfrac{\alpha}{2}}=\frac{\sin\dfrac{5\times12}{2}}{5\times\sin\dfrac{12}{2}}=0.9567$$

$$K_{\mathrm{N2}}=K_{\mathrm{p2}}K_{\mathrm{d2}}=1\times0.9567=0.9567$$

$$N_2=\frac{pqS}{a}=\frac{2\times5\times2}{1}=20$$

$$K_{\mathrm{i}}=\frac{m_1N_1K_{\mathrm{N1}}}{m_2N_2K_{\mathrm{N2}}}=\frac{3\times320\times0.925}{3\times20\times0.9567}=15.47$$

$$K_e=\frac{N_1K_{\mathrm{N1}}}{N_2K_{\mathrm{N2}}}=\frac{320\times0.925}{20\times0.9567}=15.47$$

$$K_{\mathrm{i}}K_e=15.47\times15.47=239.32$$

（4） $\Phi_{\mathrm{m}}=\dfrac{E_1}{4.44f_1N_1K_{\mathrm{N1}}}=\dfrac{0.9\times\dfrac{3000}{\sqrt{3}}}{4.44\times50\times320\times0.925}=0.0237\mathrm{Wb}$

$$B_m=\frac{\Phi_m}{\frac{2}{\pi}l\tau}=\frac{\Phi_m}{\frac{2}{\pi}\times l\times\frac{\pi D_a}{2p}}=\frac{0.0237}{\frac{18\times35\times10^{-4}}{2}}=0.7524\text{T}$$

(5) $E_2=4.44sf_1N_2K_{N2}\Phi_m=4.44\times0.0287\times50\times20\times0.9567\times0.0237=2.89\text{V}$

$f_2=sf_1=0.0287\times50=1.435\text{Hz}$

(6) $F_m=\frac{3}{2}\times0.9\times\frac{N_1K_{N1}}{p}I=\frac{3}{2}\times0.9\times\frac{320\times0.925}{2}\times22.5=4495.5\text{A}$

9-5

解：（1） $p=3$； $n_1=1000\text{r/min}$； $s_N=\frac{n_1-n_N}{n_1}=\frac{1000-975}{1000}=0.025$

$$Z_2'=\frac{r_2'}{s_N}+\text{j}x_2'=\frac{0.45}{0.025}+2\text{j}=18+2\text{j}=18.11\angle6.34°$$

$$Z=Z_1+\frac{Z_mZ_2'}{Z_m+Z_2'}=0.42+2\text{j}+\frac{(4.67+48.7\text{j})(18+2\text{j})}{(4.67+48.7\text{j})+(18+2\text{j})}=0.42+2\text{j}+\frac{48.92\angle84.52°\times18.11\angle6.34°}{55.54\angle65.91°}$$

$$=0.42+2\text{j}+14.46+6.73\text{j}=14.88+8.73\text{j}=17.25\angle30.4°$$

$$\dot{I}_1=\frac{U_{ph}\angle0°}{Z}=\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{17.25\angle30.4°}=100.41\angle-30.4°$$

$$\dot{I}_2'=\frac{\dot{I}_1Z_m}{Z_m+Z_2'}=\frac{100.41\angle-30.4°\times48.92\angle84.52°}{55.54\angle65.91°}=88.44\angle-11.79°$$

（2） $c_1=1+\frac{x_1}{x_m}=1+\frac{2}{48.7}=1.04$

$$\dot{I}_2'=\frac{U_{ph}\angle0°}{(r_1+c_1\frac{r_2'}{s_N})+\text{j}(x_1+c_1x_2')}=\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{(0.42+1.04\times\frac{0.45}{0.025})+\text{j}(2+1.04\times2)}=\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{19.14+\text{j}4.08}$$

$$=\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{19.57\angle12.03°}=88.51\angle-12.03°$$

$$\dot{I}_m'=\frac{U_{ph}\angle0°}{(r_1+r_m)+\text{j}(x_1+x_m)}=\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{(0.42+4.67)+\text{j}(2+48.7)}=\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{50.95\angle84.27°}=34\angle-84.27°$$

$$\dot{I}_1=\dot{I}_m'+\frac{\dot{I}_2'}{c_1}=34\angle-84.27°+\frac{88.51}{1.04}\angle-12.03°=86.63-\text{j}51.57=100.82\angle-30.76°$$

（3）

$$\dot{I}_2'=\frac{U_{ph}\angle0°}{(r_1+\frac{r_2'}{s_N})+\text{j}(x_1+x_2')}=\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{(0.42+\frac{0.45}{0.025})+\text{j}(2+2)}==\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{18.85\angle12.25°}=91.89\angle-12.25°$$

$$\dot{I}_m'=\frac{U_{ph}\angle0°}{(r_1+r_m)+\text{j}(x_1+x_m)}=\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{(0.42+4.67)+\text{j}(2+48.7)}=\frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°}{50.95\angle84.27°}=34\angle-84.27°$$

$$\dot{I}_1=\dot{I}_m'+\dot{I}'=34\angle-84.27°+91.89\angle-12.25°=93.19-\text{j}53.33=107.37\angle-29.78°$$

9-6

解：（1）

$P_M=P_1-p_{cu1}-p_{Fe}=6320-341-167.5=5811.5\text{W}$

$P_i=P_M-p_{cu2}=5811.5-237.5=5574\text{W}$

$P_2 = P_i - p_{\text{mec}} - p_{\text{ad}} = 5574 - 45 - 29 = 5500\text{W}$

$\eta = \dfrac{P_2}{P_1} \times 100\% = \dfrac{5500}{6320} \times 100\% = 87.03\%$

（2） $s = \dfrac{p_{\text{cu2}}}{P_{\text{M}}} = \dfrac{237.5}{5811.5} = 0.041$

$n = n_1(1-s) = 1500(1-0.041) = 1438.5\text{r/min}$

（3） $T = \dfrac{P_{\text{M}}}{\dfrac{2\pi n_1}{60}} = \dfrac{5811.5}{\dfrac{2\pi \times 1500}{60}} = 37.02\text{Nm}$

$T_2 = \dfrac{P_2}{\dfrac{2\pi n}{60}} = \dfrac{5500}{\dfrac{2\pi \times 1438.5}{60}} = 36.53\text{Nm}$

9-7

法一：

解：（1）由题意得： $x_1 = x_2' = 4r_1 = 4 \times 0.742 = 2.968\Omega$； $n_1 = 1500\text{r/min}$； $U_{\text{1ph}} = 380\text{V}$ 。

$c_1 = 1 + \dfrac{x_1}{x_m} = 1.04$，则： $x_{\text{m}} = 25x_1 = 100r_1 = 74.2\Omega$

$s = \dfrac{1500-1450}{1500} = \dfrac{1}{30} = 0.0333$

$Z_2' = \dfrac{r_2'}{s_{\text{N}}} + \text{j}x_2' = \dfrac{0.742}{0.0333} + \text{j}2.968 = 22.28 + \text{j}2.968 = 22.48\angle 7.59°\Omega$

$Z = Z_1 + \dfrac{Z_{\text{m}}Z_2'}{Z_{\text{m}} + Z_2'} = 0.742 + \text{j}2.968 + \dfrac{(9+74.2\text{j})(22.28+\text{j}2.968)}{(9+74.2\text{j})+(22.28+\text{j}2.968)} = 0.742 + \text{j}2.968 + \dfrac{74.74\angle 83.08° \times 22.48\angle 7.59°}{83.27\angle 67.93°}$

$= 0.742 + \text{j}2.968 + 18.61 + 7.8\text{j} = 19.35 + 10.77\text{j} = 22.15\angle 29.1°$

$\dot{I}_1 = \dfrac{U_{\text{ph}}\angle 0°}{Z} = \dfrac{380\angle 0°}{22.15\angle 29.1°} = 17.16\angle -29.1°$

$\dot{I}_{\text{m}} = \dfrac{\dot{I}_1 Z_2'}{Z_{\text{m}} + Z_2'} = \dfrac{17.16\angle -29.1° \times 22.48\angle 7.59°}{83.27\angle 67.93°} = 4.63\angle -89.44°$

$\dot{I}_2' = \dfrac{\dot{I}_1 Z_{\text{m}}}{Z_{\text{m}} + Z_2'} = \dfrac{17.16\angle -29.1° \times 74.74\angle 83.08°}{83.27\angle 67.93°} = 15.4\angle -13.95°$

输入功率： $P_1 = 3U_1 I_1 \cos\theta_1 = 3 \times 380 \times 17.16 \times \cos 29.1 = 17093\text{W}$

电磁功率： $P_{\text{M}} = m_1 I_2'^2 \dfrac{r_2'}{s} = 3 \times 15.4^2 \times \dfrac{0.742}{0.0333} W = 15853\text{W}$

定子铜耗： $p_{cu1} = m_1 I_1^2 r_1 = 3 \times 17.16^2 \times 0.742 = 655.5\text{W}$

转子铜耗： $p_{cu2} = m_1 I_2'^2 r_2' = 3 \times 15.4^2 \times 0.742 = 527.9\text{W}$

铁耗： $p_{\text{Fe}} = m_1 I_{\text{m}}^2 r_{\text{m}} = 3 \times 4.63^2 \times 9 = 578.8\text{W}$

（2）最大转矩

$$T_{\text{m}} = \dfrac{m_1 U_1^2}{2\Omega_1 c_1[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}]}$$

$$= \dfrac{3 \times 380^2}{\dfrac{4\pi \times 1500}{60} \times 1.04 \times 0.742 \times [1 + \sqrt{1 + 16(1+1.04)^2}]}$$

$= 193.9\text{N}\bullet\text{m}$

设 $p_0 = 0\text{W}$， $P_{\text{N}} = P_{\text{iN}} = m_1 I_2'^2 \dfrac{1-s}{s} r_2' = 3 \times 15.4^2 \times \dfrac{1-0.0333}{0.0333} \times 0.742 = 15325\text{W}$

$$T_{\mathrm{N}}=\frac{P_{\mathrm{N}}}{\frac{2\pi}{60}n_{\mathrm{N}}}=\frac{60\times15325}{2\pi\times1450}=100.98\mathrm{N\bullet m}$$

所以 $K_{\mathrm{m}}=\dfrac{T_{\mathrm{m}}}{T_{\mathrm{N}}}=\dfrac{193.9}{100.98}=1.92$

$$s_{\mathrm{k}}=\frac{c_1r_2'}{\sqrt{r_1^2+(x_1+c_1x_2')^2}}=\frac{1.04\times0.742}{\sqrt{0.742^2+(2.968+1.04\times2.968)^2}}=0.127$$

（3）要想起动时得到最大转矩，则应使

$$s_{\mathrm{k}}'=\frac{c_1(r_2'+\Delta r_2')}{\sqrt{r_1^2+(x_1+c_1x_2')^2}}=1$$

则

$$\Delta r_2'=\frac{1}{c_1}\sqrt{r_1^2+(x_1+c_1x_2')^2}-r_2'=\frac{1}{1.04}\sqrt{0.742^2+(2.968+1.04\times2.968)^2}-0.742=5.12=6.9r_2'\Omega$$

法二

解：（1）由题意得：$x_1=x_2'=4r_1=4\times0.742=2.968\Omega$；$n_1=1500\mathrm{r/min}$；$U_{1\mathrm{ph}}=380\mathrm{V}$。

$c_1=1+\dfrac{x_1}{x_m}=1.04$，则：$x_{\mathrm{m}}=25x_1=100r_1=74.2\Omega$

$$s=\frac{1500-1450}{1500}=\frac{1}{30}=0.0333$$

$$\dot{I}_2'=\frac{U_{\mathrm{ph}}\angle0^\circ}{(r_1+c_1\frac{r_2'}{s_{\mathrm{N}}})+\mathrm{j}(x_1+c_1x_2')}=\frac{380\angle0^\circ}{(0.742+1.04\times\frac{0.742}{0.0333})+\mathrm{j}(2.968+1.04\times2.968)}=\frac{380\angle0^\circ}{23.92+\mathrm{j}6.05}$$

$$=\frac{380\angle0^\circ}{24.67\angle14.19^\circ}=15.4\angle-14.19^\circ$$

$$\dot{I}_{\mathrm{m}}'=\frac{U_{\mathrm{ph}}\angle0^\circ}{(r_1+r_{\mathrm{m}})+\mathrm{j}(x_1+x_{\mathrm{m}})}=\frac{380\angle0^\circ}{(0.742+9)+\mathrm{j}(2.968+74.2)}=\frac{380\angle0^\circ}{9.742+\mathrm{j}77.168}$$

$$=\frac{380\angle0^\circ}{77.78\angle82.8^\circ}=4.89\angle-82.8^\circ$$

$$\dot{I}_1=\dot{I}_{\mathrm{m}}'+\frac{\dot{I}_2'}{c_1}=4.89\angle-82.8^\circ+\frac{15.4}{1.04}\angle-14.19^\circ=14.97-\mathrm{j}8.48=17.2\angle-29.53^\circ$$

输入功率：$P_1=3U_1I_1\cos\theta_1=3\times380\times17.2\times\cos29.53=17060\mathrm{W}$

电磁功率：$P_{\mathrm{M}}=m_1I_2'^2\dfrac{r_2'}{s}=3\times15.4^2\times\dfrac{0.742}{0.0333}W=15853\mathrm{W}$

定子铜耗：$p_{cu1}=m_1I_1^2r_1=3\times17.2^2\times0.742=658.5\mathrm{W}$

转子铜耗：$p_{cu2}=m_1I_2'^2r_2'=3\times15.4^2\times0.742=527.9\mathrm{W}$

铁耗：$p_{\mathrm{Fe}}=m_1I_{\mathrm{m}}^2r_{\mathrm{m}}=3\times4.89^2\times9=645.6\mathrm{W}$

9-8

解：（1）由题意得：$n_1=750\mathrm{r/min}$

$$s_{\mathrm{N}}=\frac{750-722}{750}=0.0373$$

$$s_{\mathrm{K}}=s_{\mathrm{N}}(K_{\mathrm{m}}+\sqrt{K_{\mathrm{m}}^2-1})=0.0373\times(2.13+\sqrt{2.13^2-1})=0.15$$

（2）简化电磁转矩表达式为

$$T=\frac{2K_{\mathrm{m}}T_{\mathrm{N}}}{\frac{s}{s_{\mathrm{K}}}+\frac{s_{\mathrm{K}}}{s}}=\frac{2\times 2.13\times 9550\times\frac{260}{722}}{\frac{s}{0.15}+\frac{0.15}{s}}=\frac{14650.38}{\frac{s}{0.15}+\frac{0.15}{s}}$$

$$T_{0.01}=\frac{14650.38}{\frac{0.01}{0.15}+\frac{0.15}{0.01}}=972.35\mathrm{Nm}$$

$$T_{0.02}=\frac{14650.38}{\frac{0.02}{0.15}+\frac{0.15}{0.02}}=1919.27\mathrm{Nm}$$

$$T_{0.03}=\frac{14650.38}{\frac{0.03}{0.15}+\frac{0.15}{0.03}}=2817.38\mathrm{Nm}$$

或：简化电磁转矩表达式为

$$T=\frac{2K_{\mathrm{m}}T_{\mathrm{N}}}{s_{\mathrm{K}}}s=\frac{14650.38}{0.15}s$$

$$T_{0.01}=\frac{2K_{\mathrm{m}}T_{\mathrm{N}}}{s_{\mathrm{K}}}s=\frac{14650.38}{0.15}\times 0.01=976.69\mathrm{Nm}$$

$$T_{0.02}=\frac{2K_{\mathrm{m}}T_{\mathrm{N}}}{s_{\mathrm{K}}}s=\frac{14650.38}{0.15}\times 0.02=1953.38\mathrm{Nm}$$

$$T_{0.03}=\frac{2K_{\mathrm{m}}T_{\mathrm{N}}}{s_{\mathrm{K}}}s=\frac{14650.38}{0.15}\times 0.03=2930.08\mathrm{Nm}$$

9-10

解：（1） $P_{\mathrm{iN}}=P_{\mathrm{N}}+p_{\mathrm{mec}}+p_{\mathrm{ad}}=150000+2600+1100=153700\mathrm{W}=153.7\mathrm{kW}$

$P_{\mathrm{MN}}=P_{\mathrm{iN}}+p_{\mathrm{cu2N}}=153.7+2.2=155.9\mathrm{kW}$

$$s_{\mathrm{N}}=\frac{p_{\mathrm{cu2N}}}{P_{\mathrm{MN}}}=\frac{2.2}{155.9}=0.014$$

$n_{\mathrm{N}}=n_1(1-s_{\mathrm{N}})=1500(1-0.014)=1479\mathrm{r/min}$

（2） $P_{\mathrm{MN}}=155.9\mathrm{kW}$

$$T_{\mathrm{N}}=\frac{P_{\mathrm{MN}}}{\Omega_1}=\frac{155.9\times 10^3}{\frac{2\pi\times 1500}{60}}=993\mathrm{Nm}$$

（3）

$$T_{\mathrm{m}}=\frac{m_1U_1^2}{2\Omega_1[r_1+\sqrt{r_1^2+(x_1+x_2')^2}]}=\frac{3\times 220^2}{\frac{4\pi\times 1500}{60}\times[0.012+\sqrt{0.012^2+(0.06+0.065)^2}]}=3360.61\mathrm{N\bullet m}$$

$T_{\mathrm{m}}'=0.64T_{\mathrm{m}}=0.64\times 3360.61=2144.56\mathrm{N\bullet m}$

$$s_{\mathrm{k}}'=s_{\mathrm{k}}=\frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2+(x_1+x_2')^2}}=\frac{0.012}{\sqrt{0.012^2+(0.06+0.065)^2}}=0.096$$

因为 $T_{\mathrm{m}}'>T_{\mathrm{N}}$，所以能持续运行。

$$s'=s_{\mathrm{k}}[\frac{T_{\mathrm{m}}'}{T_{\mathrm{N}}}-\sqrt{(\frac{T_{\mathrm{m}}'}{T_{\mathrm{N}}})^2-1}]=0.096[\frac{2144.56}{993}-\sqrt{(\frac{2144.56}{993})^2-1}]=0.096[2.16-\sqrt{2.16^2-1}]=0.024$$

$n'=n_1(1-s')=1500(1-0.024)=1464\mathrm{r/min}$

或

由 $T=\frac{2T_{\mathrm{m}}'}{s_{\mathrm{k}}}s'$ 得： $s'=\frac{s_{\mathrm{k}}}{2T_{\mathrm{m}}'}T=\frac{s_{\mathrm{k}}}{2T_{\mathrm{m}}'}T_{\mathrm{N}}=\frac{0.096}{2\times 2144.56}\times 993=0.022$

$n' = n_1(1-s') = 1500(1-0.022)=1467\text{r/min}$

9-11

解：（1）由题意得：$n_1 = 1000\text{r/min}$

$s_N = \dfrac{1000-960}{1000} = 0.04$

设 $p_{ad} = 0$

$P_{iN} = P_N + p_{mec} + p_{ad} = 28000 + 900 = 28900\text{W}$

$P_{MN} = \dfrac{P_{iN}}{1-s_N} = \dfrac{28900}{1-0.04} = 30104.2\text{W}$

$p_{cu2} = s_N P_{MN} = 0.04 \times 30104.2 = 1204.2\text{W}$

$T_N = \dfrac{P_{MN}}{\dfrac{2\pi n_1}{60}} = \dfrac{30104.2}{\dfrac{2\pi \times 1000}{60}} = 287.6\text{Nm}$

（2）$P_{1N} = P_{MN} + p_{cu1} + p_{Fe} = 30104.2 + 2400 = 32504.2\text{W}$

$\eta_N = \dfrac{P_N}{P_{1N}} \times 100\% = \dfrac{28000}{32504.2} 100\% = 86.14\%$

$I_{1N} = \dfrac{P_{1N}}{\sqrt{3} U_{1N} \cos\theta_N} = \dfrac{32504.2}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.88} = 56.12A$

（3）$s_K = s_N(K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}) = 0.04 \times (2.2 + \sqrt{2.2^2 - 1}) = 0.166$

简化电磁转矩表达式为

$T = \dfrac{2K_m T_N}{\dfrac{s}{s_K} + \dfrac{s_K}{s}} = \dfrac{2 \times 2.2 \times 287.6}{\dfrac{s}{0.166} + \dfrac{0.166}{s}} = \dfrac{1265.44}{\dfrac{s}{0.166} + \dfrac{0.166}{s}}$

转速为950r/min 时，

$s = \dfrac{1000-950}{1000} = 0.05$

$T = \dfrac{1265.44}{\dfrac{0.05}{0.166} + \dfrac{0.166}{0.05}} = 349.5\text{Nm}$

$P_M = T\Omega_1 = 349.5 \times \dfrac{2\pi \times 1000}{60} = 36581\text{W}$

$P_1 = P_M + p_{cu1} + p_{Fe} = 36581 + 2400 = 38981\text{W}$

转速为970r/min 时，

$s = \dfrac{1000-970}{1000} = 0.03$

$T = \dfrac{1265.44}{\dfrac{0.03}{0.166} + \dfrac{0.166}{0.03}} = 221.46\text{Nm}$

$P_M = T\Omega_1 = 221.46 \times \dfrac{2\pi \times 1000}{60} = 23179.48\text{W}$

$P_1 = P_M + p_{cu1} + p_{Fe} = 23179.48 + 2400 = 25579.48\text{W}$

（3）$s_K = s_N(K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}) = 0.04 \times (2.2 + \sqrt{2.2^2 - 1}) = 0.166$

简化电磁转矩表达式为

$T = \dfrac{2K_m T_N}{s_K} s = \dfrac{2 \times 2.2 \times 287.6}{0.166} s = 7623.13s$

转速为950r/min 时，

$$s=\frac{1000-950}{1000}=0.05$$

$$T=7623.13\times 0.05=381.16\text{Nm}$$

$$P_{\text{M}}=T\Omega_1=381.16\times\frac{2\pi\times 1000}{60}=39894.75\text{W}$$

$$P_1=P_{\text{M}}+p_{cu1}+p_{Fe}=39894.75+2400=42294.75\text{W}$$

转速为970r/min 时，

$$s=\frac{1000-970}{1000}=0.03$$

$$T=7623.13\times 0.03=228.69\text{Nm}$$

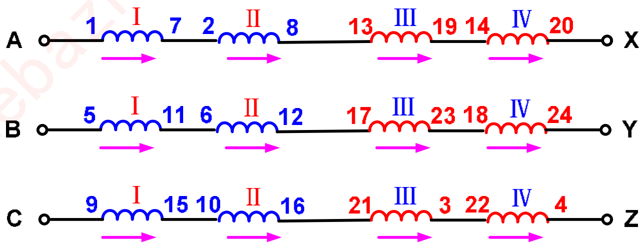
$$P_{\text{M}}=T\Omega_1=228.69\times\frac{2\pi\times 1000}{60}=23936.22\text{W}$$

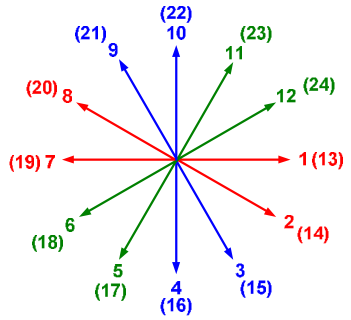
$$P_1=P_{\text{M}}+p_{cu1}+p_{Fe}=23936.22+2400=26333.22\text{W}$$

思考题

6-1 什么叫槽导体电动势星形图，如何利用槽电动势星形图来验证图 6-5 所示的三相绕组是否对称？

答：槽导体电动势星形图用来表示各个槽中导体电动势的相位关系，即为各个槽中导体电动势的相量图。





由图 6-5 及其槽导体星形图可知，A、B、C 三相感应电动势的有效值相等，相位各差 120° 电角度，所以三相绕组对称。

6-6 为什么交流电机常采用分布绕组和短距绕组？

答： 采用分布绕组和短距绕组可以削弱绕组的谐波电动势和谐波磁动势，改善其波形，使其接近正弦波。

习题：

6-7

解：

$$q=\frac{Z}{2pm}=\frac{72}{4\times3}=6\text{；}\alpha=\frac{p\times360^\circ}{Z}=\frac{2\times360^\circ}{72}=10^\circ\text{；}\tau=\frac{Z}{2p}=\frac{72}{4}=18\text{；}N=\frac{2pqN_c}{a}=\frac{4\times6\times3}{2}=36$$

$$\beta=(\tau-y)\alpha=(18-14)\times10^\circ=40^\circ$$

$$K_{p1}=\cos\frac{\beta}{2}=\cos20^\circ=0.9397$$

$$K_{p5}=\cos\frac{5\beta}{2}=\cos100^\circ=-0.1736$$

$$K_{p7}=\cos\frac{7\beta}{2}=\cos140^\circ=-0.766$$

$$K_{d1}=\frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}=\frac{\sin\frac{6\times10}{2}}{6\times\sin\frac{10}{2}}=0.9561$$

$$K_{d5}=\frac{\sin\frac{5q\alpha}{2}}{q\sin\frac{5\alpha}{2}}=\frac{\sin\frac{5\times6\times10}{2}}{6\times\sin\frac{5\times10}{2}}=0.1972$$

$$K_{d7}=\frac{\sin\frac{7q\alpha}{2}}{q\sin\frac{7\alpha}{2}}=\frac{\sin\frac{7\times6\times10}{2}}{6\times\sin\frac{7\times10}{2}}=-0.1453$$

$$E_{ph1}=4.44f_1NK_{N1}\Phi_{m1}=4.44\times50\times36\times0.9397\times0.9561\times0.185=1328.37$$

$$E_{ph5}=4.44f_1NK_{N5}\Phi_{m1}\frac{B_{m5}}{B_{m1}}=4.44\times50\times36\times0.1736\times0.1972\times0.185\times\frac{1}{8}=6.33$$

$$E_{ph7}=4.44f_1NK_{N7}\Phi_{m1}\frac{B_{m7}}{B_{m1}}=4.44\times50\times36\times0.766\times0.1453\times0.185\times\frac{1}{25}=6.58$$

$$E_{ph}=\sqrt{E_{ph1}^2+E_{ph5}^2+E_{ph7}^2}=\sqrt{1328.37^2+6.33^5+6.58^2}=1328.4$$

$$E_1=\sqrt{3}\sqrt{E_{\mathrm{ph1}}^2+E_{\mathrm{ph5}}^2+E_{\mathrm{ph7}}^2}=\sqrt{3}\times 1328.4=2300.8$$

思考题

7-1 为什么交流绕组的磁动势既是时间函数又是空间函数？

答：交流绕组的电流随时间呈正弦交变，其磁动势在空间分布，是空间函数。就单相绕组的基波磁动势而言，在空间上呈正弦分布，由于电流呈正弦交变，其幅值随时间作正弦变化，但幅值的位置固定，称为脉振磁动势。对于三相对称绕组通入三相对称电流时产生的基波磁动势，在空间上呈正弦分布，其幅值的大小虽然不变，但幅值的位置随时间变化而变化，为圆形旋转磁动势。

7-3 为什么椭圆形旋转磁动势是气隙磁动势的普遍形式，什么情况下简化成脉动磁动势？什么情况下简化成圆形旋转磁动势？

答： 在三相对称绕组中通入不对称电流时，可生成正序圆形旋转磁动势和负序圆形旋转磁动势，它们幅值不同，转速相同，同为同步转速，但转向相反；它们的合成磁动势的幅值随时间变化而变化，转速也不是常数，所以说椭圆形旋转磁动势是气隙磁动势的普遍形式。

当正序圆形旋转磁动势和负序圆形旋转磁动势的幅值相同时，磁动势的幅值呈正弦变化，转速均为零，这就是脉动磁动势。

当正序圆形旋转磁动势和负序圆形旋转磁动势有一个为零时，磁动势的幅值和转速均为常数，这就是圆形旋转磁动势。

7-6 试证明：任一圆形旋转磁动势可分解为两个振幅相等的脉振磁动势，它们在空间轴上相差$90°$电角度，在时间相位上也相差$90°$电角度。

证明：设圆形旋转磁动势的表达式为： $f = F\cos(x - wt)$

$$f = F\cos(x-wt) = F[\frac{1}{2}\cos(x-wt)+\frac{1}{2}\cos(x+wt)+\frac{1}{2}\cos(x-wt)-\frac{1}{2}\cos(x+wt)]$$

$$= F[\frac{1}{2}\cos(x-wt)+\frac{1}{2}\cos(x+wt)+\frac{1}{2}\cos(x-wt)+\frac{1}{2}\cos(x+wt-180°)]$$

$$= F\cos wt\cos x + F\cos(wt-90°)\cos(x-90°)$$

或：

$$f = F\cos(x-wt) = F[\frac{1}{2}\cos(x-wt)-\frac{1}{2}\cos(x+wt)+\frac{1}{2}\cos(x-wt)+\frac{1}{2}\cos(x+wt)]$$

$$= F\sin wt\sin x + F\cos wt\cos x$$

$$= F\sin wt\sin x + F\sin(wt-90°)\sin(x-90°)$$

习题：

7-3

解：（1）圆形旋转磁动势（正序）

$Z = q\times 2pm$=3×4×3=36； $\alpha = \frac{p\times 360°}{Z} = \frac{2\times 360°}{36}$=20°； $\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{4}$=9；

$$\beta = (\tau - y)\alpha = (9-7)\times 20° = 40°$$

$$K_{\mathrm{p1}} = \cos\frac{\beta}{2} = \cos 20° = 0.9397$$

$$K_{\mathrm{d1}} = \frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin\frac{3\times 20}{2}}{3\times\sin\frac{20}{2}} = 0.9598$$

$$K_{\mathrm{N1}} = K_{\mathrm{p1}}K_{51} = 0.9397\times 0.9598 = 0.9019$$

$$F_{\mathrm{m1}} = 0.9(2qN_{\mathrm{c}})K_{\mathrm{N1}}I_{\mathrm{c}} = 0.9\times 2\times 3\times 4\times 0.9019\times 100\text{=1948.1}$$

$$F_1 = \frac{3}{2}F_{\mathrm{m1}} = \frac{3}{2}\times 1948.1\text{=2922.2}$$

或：

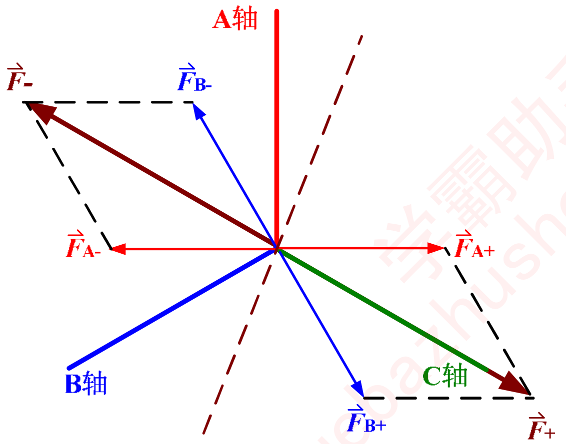
$$N = \frac{2pqN_c}{a} = 2\times 2\times 3\times 4 = 48$$

$$F_1=\frac{3}{2}F_{m1}=\frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{NK_{N1}}{p}I$$
$$=\frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{48\times 0.9019}{2}\times 100=2922.2A$$

（2）合成磁动势为零

（3）合成磁动势为脉动磁势

$$f_a=F_{m1}\sin\omega t\cdot\sin x$$
$$f_b=-F_{m1}\sin\omega t\cdot\sin\left(x-120^\circ\right)$$
$$f_c=0$$
$$f_1=f_a+f_b+f_c=F_{m1}\left[\sin\omega t\cdot\sin x-\sin\omega t\cdot\sin(x-120^\circ)\right]$$
$$=\sqrt{3}F_{m1}\sin\omega t\cdot\sin\left(x+30^\circ\right)$$
$$=\frac{1}{2}F_{m1}\left[\cos(\omega t-x)-\cos(\omega t-x+120^\circ)\right]-\frac{1}{2}F_{m1}\left[\cos(\omega t+x)-\cos(\omega t+x-120^\circ)\right]$$
$$=\frac{\sqrt{3}}{2}F_{m1}\left[\cos\left(\omega t-x-30^\circ\right)-\cos\left(\omega t+x+30^\circ\right)\right]$$
$$F_1=\sqrt{3}F_{m1}=3374A$$



$$i_a=100\sqrt{2}\sin\omega t=100\sqrt{2}\cos(\omega t-90^\circ)$$
$$i_b=-100\sqrt{2}\sin\omega t=100\sqrt{2}\cos(\omega t+90^\circ)$$

（4）椭圆形磁势

法一：

$$\dot I_{a+}=\frac{1}{3}\left(\dot I_a+a\dot I_b+a^2\dot I_c\right)=\frac{1}{3}(100\angle 0^\circ-50\angle-60^\circ\bullet\angle 120^\circ-86\angle 30^\circ\bullet\angle 240^\circ)$$
$$=\frac{1}{3}(100-50\angle 60^\circ-86\angle 270^\circ)$$
$$=\frac{1}{3}(100-50\cos 60^\circ-\mathrm{j}50\sin 60^\circ+\mathrm{j}86)$$
$$=28.8\angle 29.7^\circ$$
$$\dot I_{a-}=\frac{1}{3}\left(\dot I_a+a^2\dot I_b+a\dot I_c\right)=\frac{1}{3}(100\angle 0^\circ-50\angle-60^\circ\bullet\angle 240^\circ-86\angle 30^\circ\bullet\angle 120^\circ)$$
$$=\frac{1}{3}(100-50\angle 180^\circ-86\angle 150^\circ)$$
$$=\frac{1}{3}(100+50-86\cos 150^\circ-\mathrm{j}86\sin 150^\circ)$$
$$=76.2\angle-10.8^\circ$$

$$\dot I_{a0}=\frac{1}{3}\left(\dot I_a+\dot I_b+\dot I_c\right)=\frac{1}{3}(100\angle 0°-50\angle -60°-86\angle 30°)$$
$$=\frac{1}{3}(100-50\cos 60°+\mathrm{j}50\sin 60°-86\cos 30°-\mathrm{j}86\sin 30°)$$
$$=0$$

正序电流 I_{a+} 产生正序旋转磁动势，幅值 F_+

$$F_+=\frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{NK_{N1}}{p}I_{a+}=\frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{48\times 0.9019}{2}\times 28.8=841.6A$$

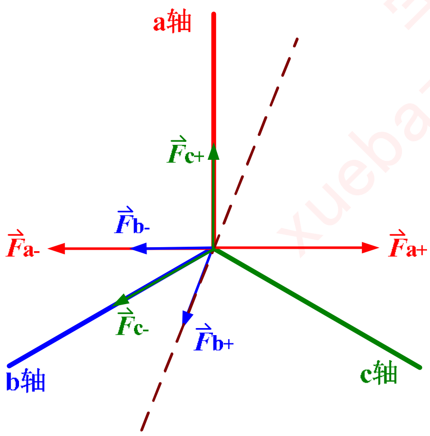
正序电流 I_{a-} 产生正序旋转磁动势，幅值 F_-

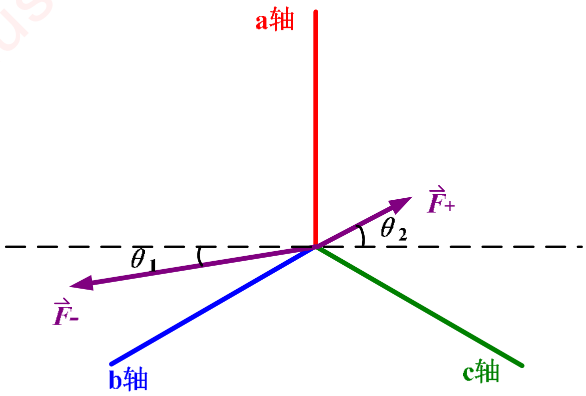
$$F_-=\frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{NK_{N1}}{p}I_{a-}=\frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{48\times 0.9019}{2}\times 76.2=2226.7A$$

零序电流 I_{a0} 产生合成磁动势为零

法二：

$$i_{\mathrm{a}}=100\sqrt{2}\sin\omega t=100\sqrt{2}\cos(\omega t-90°)$$
$$i_{\mathrm{b}}=-50\sqrt{2}\sin(\omega t-60°)=50\sqrt{2}\cos(\omega t+30°)$$
$$i_{\mathrm{c}}=-86\sqrt{2}\sin(\omega t+30°)=86\sqrt{2}\cos(\omega t+120°)$$
$$F_{\mathrm{a}+}=F_{\mathrm{a}-}=\frac{1}{2}\times 0.9\times\frac{NK_{\mathrm{N1}}}{p}I_{\mathrm{a}}=\frac{1}{2}\times 0.9\times\frac{48\times 0.9019}{2}\times 100=974.1A$$
$$F_{\mathrm{b}+}=F_{\mathrm{b}-}=\frac{1}{2}\times 0.9\times\frac{NK_{\mathrm{N1}}}{p}I_{\mathrm{b}}=\frac{1}{2}\times 0.9\times\frac{48\times 0.9019}{2}\times 50=487A$$
$$F_{\mathrm{c}+}=F_{\mathrm{c}-}=\frac{1}{2}\times 0.9\times\frac{NK_{\mathrm{N1}}}{p}I_{\mathrm{c}}=\frac{1}{2}\times 0.9\times\frac{48\times 0.9019}{2}\times 86=837.7A$$





$$F_-=\sqrt{(974.1+487+837.7\cos 30°)^2+(837.7\sin 30°)^2}$$
$$=\sqrt{2186.57^2+418.85^2}$$
$$=2226.3$$
$$\theta_1=\arctan\frac{418.85}{2186.57}=10.8°$$
$$F_+=\sqrt{(974.1+487\cos 60°)^2+(837.7-487\sin 60°)^2}$$
$$=\sqrt{730.6^2+415.9^2}$$
$$=840.7$$
$$\theta_2=\arctan\frac{415.9}{730.6}=29.7°$$
$$f_1=f_a+f_b+f_c=840.7\cos(x-\omega t+90°-29.7°)+2226.3\cos(x+\omega t-90°-10.8°)$$

$= -840.7\sin(x-\omega t-29.7°)+2226.3\sin(x+\omega t-10.8°)$

7-5

解：

$\because i_{a}=I_{m}\sin\omega t; N_{a}K_{Na}:N_{b}K_{Nb}=2:3$

$\therefore i_{b}=\frac{2}{3}I_{m}\sin(\omega t-\theta)$

$f_{a1}=F_{m1}\sin\omega t\cos x=\frac{1}{2}F_{m1}[\sin(\omega t-x)+\sin(\omega t+x)]$

$f_{b1}=F_{m1}\sin(\omega t-\theta)\cos(x-60°)=\frac{1}{2}F_{m1}[\sin(\omega t-\theta-x+60°)+\sin(\omega t-\theta+x-60°)]$

如果要获得正向旋转的磁动势：

$-\sin(\omega t+x)=\sin(\omega t-\theta+x-60°)=\sin(\omega t+x-180°)$

得 $\theta=120°$

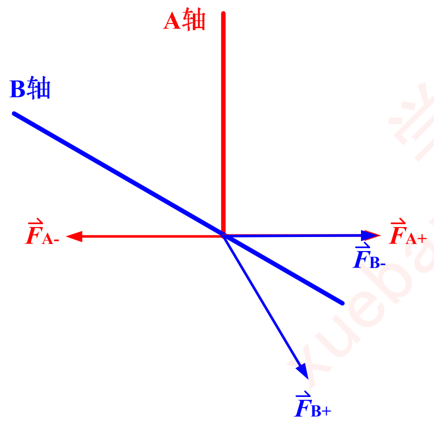
$\therefore i_{b}=\frac{2}{3}I_{m}\sin(\omega t-120°)$

如果要获得反向旋转的磁动势：

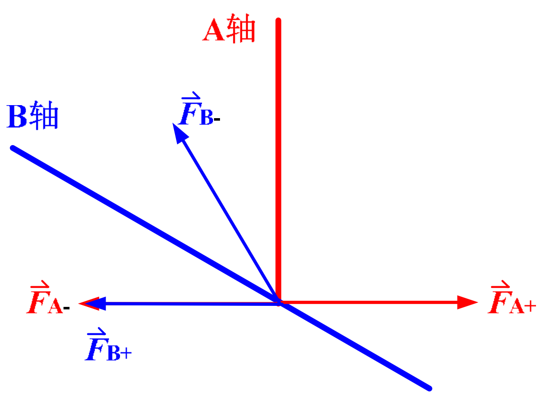
$-\sin(\omega t-x)=\sin(\omega t-\theta-x+60°)=\sin(\omega t-x+180°)$

得 $\theta=-120°$

$\therefore i_{b}=\frac{2}{3}I_{m}\sin(\omega t+120°)$



$\therefore i_{b}=\frac{2}{3}I_{m}\cos(\omega t+150°)=\frac{2}{3}I_{m}\sin(\omega t-120°)$



$\therefore i_{b}=\frac{2}{3}I_{m}\cos(\omega t+30°)=\frac{2}{3}I_{m}\sin(\omega t+120°)$

思考题

3-3 试说明三相变压器组为什么不采用 Yy 连接，而三相铁芯变压器又可用呢？

答：三相变压器一次侧 Y 连接时，由于 3 次谐波电流不能流通，励磁电流为正弦波，在磁路饱和的情况下，铁芯中的磁通为平顶波，不仅含有基波磁通，还含有 3 次谐波磁通。

对于三相变压器组，各相磁路独立，3 次谐波磁路与基波磁路相同，磁阻小，3 次谐波磁通幅值较大，同时考虑到其频率为基波频率的 3 倍，所以 3 次谐波电动势较大，其振幅可达基波振幅的 50%~60%，导致电动势波形严重畸变，所产生的过电压有可能危害绝缘，因此，三相变压器组不采用 Yy 连接。

对于三相铁芯变压器，三相磁路彼此相关，3 次谐波磁通在时间上同相位，只能以铁芯周围的油、邮箱壁和部分铁轭等形成回路，磁阻较大，故 3 次谐波磁通及 3 次谐波电动势都很小，相电动势接近于正弦波，所以可以接成三相铁芯变压器 Yy。

3-4 为什么大容量变压器常接成 Yd 连接而不接成 Yy 连接呢？

答：对于 Yy 连接的三相变压器组，由于磁路独立，3 次谐波磁通较大且频率较高，故 3 次谐波电动势较大，相电动势波形严重畸变而有可能危害绝缘，不能采用 Yy 连接；对于 Yy 连接的三相铁芯变压器，3 次谐波磁通经过邮箱壁和其他构件中时会产生损耗引起局部过热，变压器容量受到限制不能太大，故大容量变压器不采用 Yy 连接。

对于 Yd 连接的三相变压器，二次三角形电路可以提供 3 次谐波电流，铁芯中的 3 次谐波磁通和绕组中的 3 次谐波电动势都被大大削弱，对变压器的运行影响很小，相电动势波形接近正弦波，故大容量变压器常接成 Yd 连接。

3-6 Yy 连接的三相变压器组中，相电动势有 3 次谐波，线电动势中有无 3 次谐波？为什么？

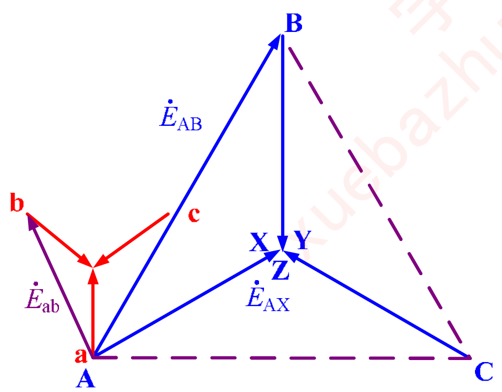
答：线电动势中无 3 次谐波。因为 3 次谐波电动势相位一致，在线电动势中相互抵消。

习题：

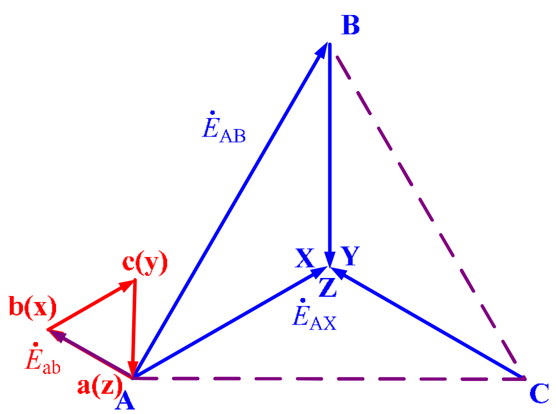
3-2

解：

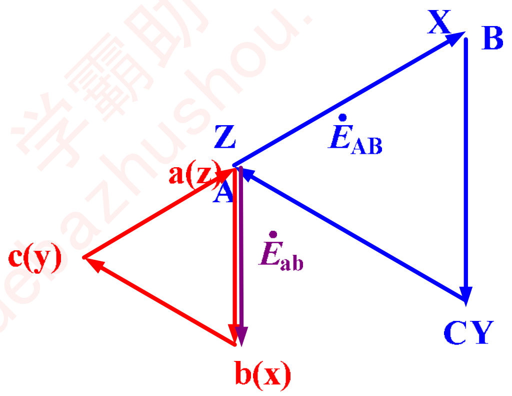
（a）Yy10



（b）Yd9



（c）Dd4



3-3

解： 法一

（1） $\dfrac{I_{I*}}{I_{II*}}=\dfrac{Z_{II*}}{Z_{I*}}=\dfrac{u_{kII*}}{u_{kI*}}=\dfrac{1}{0.9}$

$S_{\Sigma}=S_{NI}+0.9S_{NII}=1000+0.9\times500=1450\text{kVA}$

（2） $\dfrac{I_{I*}}{I_{II*}}=\dfrac{Z_{II*}}{Z_{I*}}=\dfrac{u_{kII*}}{u_{kI*}}=\dfrac{0.9}{1}$

$S_{\Sigma}=0.9S_{NI}+S_{NII}=0.9\times1000+500=1400\text{kVA}$

法二

（1） u_{kI*} 较小，变压器 I 先满载， $S_{I}=S_{NI}=1000\text{kVA}$

$\dfrac{S_{NI}}{u_{kI*}}=\dfrac{1000}{0.9u_{kII*}}$ $\dfrac{S_{NII}}{u_{kII*}}=\dfrac{500}{u_{kII*}}=\dfrac{450}{0.9u_{kII*}}$ $\sum\limits_{i=1}^{\infty}\dfrac{S_{Ni}}{u_{ki*}}=\dfrac{1000}{0.9u_{kII*}}+\dfrac{450}{0.9u_{kII*}}=\dfrac{1450}{0.9u_{kII*}}$

$$S_{\Sigma}=\frac{\sum\limits_{i=1}^{\infty}\dfrac{S_{Ni}}{u_{ki*}}}{\dfrac{S_{NI}}{u_{kI*}}}S_{I}=\frac{\dfrac{1450}{0.9u_{kII*}}}{\dfrac{1000}{0.9u_{kII*}}}\times1000=1450$$

3-4

解：（1） $I_{1NI}=\dfrac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\dfrac{500}{\sqrt{3}\times6.3}$=45.82A， $I_{1NII}=\dfrac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\dfrac{1000}{\sqrt{3}\times6.3}$=91.65A

变压器 I： $I_{1k*}=\dfrac{32}{45.82}=0.698$， $U_{1k*}=\dfrac{250}{6300}=0.0397$

$Z_{k*}=\dfrac{0.0397}{0.698}=0.0569$

变压器 II： $I_{1k*}=\dfrac{82}{91.65}=0.895$， $U_{1k*}=\dfrac{300}{6300}=0.0476$

$Z_{k*}=\dfrac{0.0476}{0.895}=0.0532$，

所以： $u_{kI*}=0.0569$ $u_{kII*}=0.0532$

$u_{kI}=u_{kI*}U_{1N}=0.0569\times6300=358.5V$

$u_{kII}=u_{kII*}U_{1N}=0.0532\times6300=335.2V$

（2） $\dfrac{S_{I*}}{S_{II*}}=\dfrac{I_{I*}}{I_{II*}}=\dfrac{Z_{II*}}{Z_{I*}}=\dfrac{u_{kII*}}{u_{kI*}}=\dfrac{0.0532}{0.0569}=0.935$

$\because S_{\text{I}*}S_{\text{NI}}+S_{\text{II}*}S_{\text{NII}}=1200$
$\therefore 0.935S_{\text{II}*}S_{\text{NI}}+S_{\text{II}*}S_{\text{NII}}=1200$
$\therefore S_{\text{II}*}(0.935S_{\text{NI}}+S_{\text{NII}})=1200$
$\therefore S_{\text{II}*}(0.935\times 500+1000)=1200$
$\therefore S_{\text{II}*}=0.818$
得： $S_{\text{I}*}=0.935S_{\text{II}*}=0.935\times 0.818=0.765$
$S_{\text{I}}=S_{\text{I}*}S_{\text{NI}}=0.765\times 500=382\text{kVA}$
$S_{\text{II}}=S_{\text{II}*}S_{\text{NII}}=0.818\times 1000=818\text{kVA}$

（3） $\dfrac{S_{\text{I}*}}{S_{\text{II}*}}=\dfrac{I_{\text{I}*}}{I_{\text{II}*}}=\dfrac{Z_{\text{II}*}}{Z_{\text{I}*}}=\dfrac{u_{\text{kII}*}}{u_{\text{kI}*}}=\dfrac{0.0532}{0.0569}=\dfrac{0.935}{1}$

$S_{\Sigma}=0.935S_{\text{NI}}+S_{\text{NII}}=0.935\times 500+1000=1467\text{kVA}$

（4）法一
利用（2）的结论，并考虑二次侧三角形连接

$$I_{2\text{phI}}=\frac{S_{\text{I}}}{3U_{2\text{Nph}}}=\frac{382}{3\times 0.4}=318\text{A}$$

$$I_{2\text{phII}}=\frac{S_{\text{I}}}{3U_{2\text{Nph}}}=\frac{682}{3\times 0.4}=682\text{A}$$

法二

$$\frac{I_{\text{I}*}}{I_{\text{II}*}}=\frac{Z_{\text{II}*}}{Z_{\text{I}*}}=\frac{u_{\text{kII}*}}{u_{\text{kI}*}}=\frac{0.0532}{0.0569}=0.935$$

$\because I_{\text{I}*}S_{\text{NI}}+S_{\text{II}*}S_{\text{NII}}=1200$
$\therefore 0.935S_{\text{II}*}S_{\text{NI}}+S_{\text{II}*}S_{\text{NII}}=1200$
$\therefore S_{\text{II}*}(0.935S_{\text{NI}}+S_{\text{NII}})=1200$
$\therefore S_{\text{II}*}(0.935\times 500+1000)=1200$
$\therefore S_{\text{II}*}=0.818$
得： $S_{\text{I}*}=0.935S_{\text{II}*}=0.935\times 0.818=0.765$
考虑二次侧三角形连接

$$I_{2\text{NphI}}=\frac{S_{\text{N}}}{3U_{2\text{Nph}}}=\frac{500}{3\times 0.4}=416.7\text{A}$$

$$I_{2\text{NphII}}=\frac{S_{\text{N}}}{3U_{2\text{Nph}}}=\frac{1000}{3\times 0.4}=833.3\text{A}$$

$$I_{2\text{I}}=I_{\text{I}*}I_{2\text{Nph}}=S_{\text{I}*}I_{2\text{Nph}}=0.765\times 416.7=318.8\text{A}$$

$$I_{2\text{II}}=I_{\text{II}*}I_{2\text{NII}}=S_{\text{II}*}I_{2\text{NII}}=0.818\times 833.3=681.6\text{A}$$

法三
不计变压器漏阻抗压降，并考虑二次侧三角形连接

$$I_{2\text{NphI}}=\frac{S_{\text{N}}}{3U_{2\text{Nph}}}=\frac{500}{3\times 0.4}=416.7\text{A}$$

$$I_{2\text{NphII}}=\frac{S_{\text{N}}}{3U_{2\text{Nph}}}=\frac{1000}{3\times 0.4}=833.3\text{A}$$

$$I_{2\text{ph}}=\frac{P_2}{3U_{2\text{Nph}}\cos\theta_2}=\frac{1200}{3\times 0.4}=1000\text{A}$$

$$\frac{I_{\mathrm{I}*}}{I_{\mathrm{II}*}}=\frac{Z_{\mathrm{II}*}}{Z_{\mathrm{I}*}}=\frac{u_{\mathrm{kII}*}}{u_{\mathrm{kI}*}}=\frac{0.0532}{0.0569}=0.935$$

$\because I_{\mathrm{I}*}I_{\mathrm{2NphI}}+I_{\mathrm{II}*}I_{\mathrm{2NphII}}=1000$

$\therefore 0.935I_{\mathrm{2NphI}}+I_{\mathrm{II}*}I_{\mathrm{2NphII}}=1000$

$\therefore I_{\mathrm{II}*}(0.935I_{\mathrm{2NphI}}+I_{\mathrm{2NphII}})=1000$

$\therefore I_{\mathrm{II}*}(0.935\times 416.7+833.3)=1000$

$\therefore I_{\mathrm{II}*}=0.818$

$I_{\mathrm{I}*}=0.935I_{\mathrm{II}*}=0.935\times 0.818=0.765$

$I_{\mathrm{2I}}=I_{\mathrm{I}*}I_{\mathrm{2Nph}}=0.765\times 416.7=318.8\mathrm{A}$

$I_{\mathrm{2II}}=I_{\mathrm{II}*}I_{\mathrm{2NII}}=0.818\times 833.3=681.6\mathrm{A}$

思考题

10-8 变频调速时，通常为什么要求电源电压随频率变化而变化？若频率变化电压大小不会变会产生什么后果？

答：变频调速时，通常希望电动机的主磁通Φ_m保持不变，从而使电动机磁路的饱和程度、激磁电流和电动机的功率因数均可基本保持不变。忽略定子阻抗压降，由$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 K_{N1} \Phi_m$可知，若要主磁通$\Phi_m$保持不变，应使$\frac{U_1}{f_1} \approx \frac{E_1}{f_1} = C$，即电压与频率成正比变化。若从基频向下调时，频率减小电压大小不变，主磁通Φ_m将会反比上升，引起磁路饱和，激磁电流快速上升，使功率因数下降，定子铜耗大大增大，严重时烧坏电机。若从基频向上调时，频率增大电压大小不变，主磁通Φ_m将会反比下降，使得最大转矩和临界转差率减小，近似为恒功率调速。

10-10 绕线异步电动机的转子回路总串接电阻能改善起动性能，是否电阻串接的越大越好，为什么？又为什么要在起动过程中逐级切除起动电阻，如一次性切除起动电阻有何不良后果？

答：从异步电动机的 T 形等效电路可知，可以减小起动电流，从异步电动机的 T-s 特性曲线可知，适当增加转子电阻，可保证T_m不变而s_k增大，使得T_{st}增大，当$s_k = 1$时，$T_{st} = T_m$获得最大转矩，如进一步增大转子电阻，$s_k > 1$，T_{st}将会减小。

或：适当增加转子电阻，可减小了定、转子电流，但转子侧的功率因数$\cos\theta_2$有所增加，使得转子电流的有功分量增加，使电机的起动转矩增加。如果串接的电阻太大，虽然转子侧的功率因数$\cos\theta_2$进一步提高，但增加得不多，而定、转子电流虽减小了很多，但使得转子电流的有功分量反而减小，使电机的起动转矩减小。

起动过程中逐级切除起动电阻，可使得在起动过程中均有比较大的转矩，从而加速起动过程。如在转速较低时，一次性切除起动电阻，会导致定子电流增加，转矩减小，起不到串电阻起动的作用；如在转速较高时，一次性切除起动电阻，随然定子电流较小，但在起动过程中转矩也较小，起动过程较慢。

习题：

10-3

解：（1）起动时：$n = 0$，$s_k = 1$，则$T_{st} = T_m$，$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m} = 1 + \frac{0.2}{5} = 1.04$ 即

$$s_k = \frac{c_1(r_2' + \Delta r_2')}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} = \frac{1.04 \times (0.072 + \Delta r_2')}{\sqrt{0.072^2 + (0.2 + 1.04 \times 0.2)^2}} = 1$$

解得：$\Delta r_2' = 0.326(\Omega)$

$$I_{st} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2' + \Delta r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{380}{\sqrt{(0.072 + 0.072 + 0.326)^2 + (0.2 + 0.2)^2}} = 615.71(A)$$

（2）

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03,$$

设$\dot{U}_1 = 380\angle 0°$，根据 T 型等效电路可得：

$$Z_1 = r_1 + jx_1 = 0.072 + j0.2 = 0.213\angle 70.2°$$

$$Z_m = r_m + jx_m = 0.7 + j5 = 5.05\angle 82.03^\circ$$

$$Z_2 = r_2'/s_N + jx_2' = \frac{0.072}{0.03} + j0.2 = 2.41\angle 4.76^\circ$$

$$\dot{I}_{1N} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m//Z} = \frac{380\angle 0^\circ}{0.072 + \mathrm{j}0.2 + \dfrac{5.05\angle 82.03^\circ \times 2.41\angle 4.76^\circ}{5.05\angle 82.03^\circ + 2.41\angle 4.76^\circ}}$$

$$= \frac{380\angle 0^\circ}{0.072 + \mathrm{j}0.2 + 2.01\angle 27.59^\circ} = \frac{380\angle 0^\circ}{2.17\angle 31.41^\circ} = 175.12\angle -31.41^\circ$$

若限制 $\mathrm{I_{st}} \le 2\mathrm{I_N}$，则有：

$$I_{st}' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2' + \Delta r_2'')^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{380}{\sqrt{(0.072 + 0.072 + \Delta r_2'')^2 + (0.2 + 0.2)^2}} \le 2 \times 175.12$$

解得： $\Delta r_2'' = 0.865(\Omega)$

$$T_{st}' = \frac{m_1}{\Omega_1}\frac{U_1^2(r_2' + \Delta r_2'')}{(r_1 + r_2' + \Delta r_2'')^2 + (x_1 + x_2')^2} = \frac{3 \times 60}{2\pi \times 1500}\frac{380^2 \times (0.072 + 0.865)}{(0.072 + 0.072 + 0.865)^2 + (0.2 + 0.2)^2}$$

$$= 2195(Nm)$$

思考题

1-1 电机和变压器的磁路常采用什么材料制成？这种材料有哪些主要特征？

答：电机和变压器的铁芯常采用硅钢片制成，对于磁场恒定的磁路也常采用导磁性能较好的钢板和铸钢制成。这些材料的主要特性是导磁性能好，铁芯损耗小。

1-6 电抗的物理意义是什么？它的大小和哪些量有关？

答：当线圈中流过正弦交流电流时，电感的作用就用相应的电抗表示，它反应了流过线圈中的正弦交流电流产生感应电动势的能力。它与电感和交变频率成正比。

1-7 一台电机在同一时间决不能既是发电机又是电动机，为什么说发电机作用和电动机作用同时存在于一台电机中？

答：电机无论是作发电机运行还是作电动机运行，其导体与磁场间存在相对运动，在导体中产生感应电动势，这就是发电机作用；导体中有电流流过，该载流导体与磁场作用产生转矩，这就是电动机作用。电机运行时，正是有感应电动势和电磁转矩同时存在，才实现了机电能量的相互转换。

习题

1-1

解： Φ=0.003Wb；$S=\dfrac{\pi D^2}{4}=\dfrac{3.14\times 5^2}{4}\times 10^{-4}=1.963\times 10^{-3}\,\mathrm{m}^2$

$$B=\frac{\Phi}{S}=\frac{0.003}{1.963\times 10^{-3}}=1.53\mathrm{T};\ H=30+\frac{40-30}{1.55-1.48}(1.53-1.48)=37.14\mathrm{A/cm}$$

$$L=2\pi r=6.28\times 30=188.4\mathrm{cm};\ N=\frac{F}{I}=\frac{HL}{I}=\frac{37.14\times 188.4}{5}=1399\text{匝}$$

1-2

解：（1）

$$B=\frac{\Phi}{S}=\frac{0.003}{1.963\times 10^{-3}}=1.53\mathrm{T};\ H_1=30+\frac{40-30}{1.55-1.48}(1.53-1.48)=37.14\mathrm{A/cm};\ H_\sigma=\frac{B}{\mu_0}=\frac{1.53}{4\pi\times 10^{-5}}=1.22\times 10^4\mathrm{A/cm}$$

$$L_1=2\pi r=6.28\times 30=188.4\mathrm{cm};\ L_\sigma=0.1\mathrm{cm};\ N=\frac{F}{I}=\frac{H_1L_1+H_\sigma L_\sigma}{I}=\frac{37.14\times 188.4+1.22\times 10^4\times 0.1}{5}=1643\text{匝}$$

（2）设磁通 Φ=0.0029Wb

$$B=\frac{\Phi}{S}=\frac{0.0029}{1.963\times 10^{-3}}=1.48\mathrm{T};\ H_1=30\mathrm{A/cm};\ H_\sigma=\frac{B}{\mu_0}=\frac{1.48}{4\pi\times 10^{-5}}=1.17\times 10^4\mathrm{A/cm}$$

$$L_1=2\pi r=6.28\times 30=188.4\mathrm{cm};\ L_\sigma=0.1\mathrm{cm};\ I=\frac{F}{N}=\frac{H_1L_1+H_\sigma L_\sigma}{N}=\frac{30\times 188.4+1.17\times 10^4\times 0.1}{1400}=4.87\mathrm{A}<5\mathrm{A}$$

设磁通 Φ=0.00295Wb

$$B=\frac{\Phi}{S}=\frac{0.00295}{1.963\times 10^{-3}}=1.5\mathrm{T};\ H_1=30+\frac{40-30}{1.55-1.48}(1.5-1.48)=32.86\mathrm{A/cm};\ H_\sigma=\frac{B}{\mu_0}=\frac{1.5}{4\pi\times 10^{-5}}=1.19\times 10^4\mathrm{A/cm}$$

$$I=\frac{F}{N}=\frac{H_1L_1+H_\sigma L_\sigma}{N}=\frac{32.86\times 188.4+1.19\times 10^4\times 0.1}{1400}=5.27\mathrm{A}>5\mathrm{A}$$

按插值法求取磁通：

$$\Phi=0.0029+\frac{0.00295-0.0029}{5.27-4.87}(5-4.87)=0.00292\mathrm{Wb}$$

1-3

解：（1） $\Omega=\dfrac{2\pi n}{60}=\dfrac{2\pi\times 1000}{60}=104.7\mathrm{rad/s}$

$\Psi_m = N\Phi_m = NB_m S = 100\times0.8\times0.1\times0.2 = 1.6\text{Wb}$

设线圈平面与磁力线垂直时 $t=0$，ψ 随时间的表达式为

$\psi = \Psi_m \cos\Omega t = 1.6\cos104.7t$

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = 167.52\sin104.7t\text{V}$$

（2）$E_m = 167.52\text{V}$；出现在线圈平面与磁力线平行。

（3）$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 118.5\text{V}$

1-4

解：（1）$\omega=2\pi f = 2\pi\times50 = 314\text{rad/s}$

$\Psi_m = N\Phi_m = NB_m S = 100\times0.8\times0.1\times0.2 = 1.6\text{Wb}$

设 $t=0$ 时，$\Phi=\Phi_m$，则 ψ 随时间的表达式为

$\psi = \Psi_m\cos\omega t = 1.6\cos314t$

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = 502.4\sin314t\text{V}$$

（2）$\omega=2\pi f = 2\pi\times50 = 314\text{rad/s}$

$$\Psi_m = N\Phi_m\cos30° = NB_m S\cos30° = 100\times0.8\times0.1\times0.2\times\frac{\sqrt{3}}{2} = 1.384\text{Wb}$$

设 $t=0$ 时，$\Phi=\Phi_m$，则 ψ 随时间的表达式为

$\psi = \Psi_m\cos\omega t = 1.386\cos314t$

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = 435.2\sin314t\text{V}$$

(3) $\Omega=\frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi\times1000}{60} = 104.7\text{rad/s}$

$\omega=2\pi f = 2\pi\times50 = 314\text{rad/s}$

$\Psi_m = N\Phi_m = NB_m S = 100\times0.8\times0.1\times0.2 = 1.6\text{Wb}$

$\psi = \Psi_m\cos\omega t\cos\Omega t = 1.6\cos314t\cos104.7t = 0.8(\cos418.7t+\cos209.3t)\text{Wb}$

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = 0.8\times418.7\times\sin418.7t + 0.8\times209.3\times\sin209.3t = (335\sin418.7t+167\sin209.3t)\text{V}$$

电机学第二版　胡虔生 编

习题集目录

第一章　绪论

P17：1-1

解：$B=\frac{\Phi}{S}=\frac{0.003}{0.025^2\pi}=1.53T$

$$\frac{H_x-30}{1.53-1.48}=\frac{40-30}{1.55-1.48}$$
$$\Rightarrow H_x=37.14$$

$$N=\frac{F}{I}=\frac{H_x l}{I}=\frac{37.14\times 2\pi\times 30}{5}\approx 1400\text{匝}$$

P17：1-2

解：

(1)

$$N=N_1+N_2=37.14\times\frac{2\pi\times 30-0.1}{5}+\frac{\frac{1.53}{4\pi\times 10^{-7}}\times 0.1}{5}=1399.4+243.5=1643\text{匝}$$

(2) 设 B 在（1.48~1.55）之间

$$F=NI=1400\times 5=\frac{B}{4\pi\times 10^{-7}}\times 10^{-3}+\left[\frac{40-30}{1.55-1.48}\times(B-1.48)+30\right]\times(2\pi\times 30-0.1)$$
$$\Rightarrow 7000=795.715B+26913.651B-34180.417$$
$$\Rightarrow B=1.486\text{（与假设相符）}$$

$$\Phi=\mathrm{BS}=1.486\times 0.025^2\pi=2.918\times 10^{-3}\,\mathrm{wb}$$

P18：1-4

解：$s=20^2\times 10^{-6}m^2$

(1) $e=-N\frac{d\Phi}{dt}=-NS\frac{dB}{dt}=-200\times 20^2\times 10^{-6}\times\frac{d0.8\sin 314t}{dt}=-20.096\cos 314t$

(2) $e=-N\frac{d\Phi}{dt}=-NS\cos 60^\circ\frac{dB}{dt}=-10.048\cos 314t$

(3) $\Omega=\frac{2\pi n}{60}=\frac{2\pi\times 1000}{60}=\frac{100\pi}{3}rad/s$

设t时刻平面与磁力线夹角 为θ'，则 $\cos\theta' = \cos(\Omega t + \theta)$，

当$t = 0$时，$\cos\theta' = 1$则 $\cos\theta' = \cos\Omega t$

$$e = -N\frac{d\Phi}{dt} = -NS\frac{dB\cos\theta'}{dt} = -200\times 20^2\times\frac{d0.8\sin 314t\cdot\cos\frac{100\pi}{3}t}{dt}$$

$$= 6.699\sin 104.72t\sin 314t - 20.096\cos 104.72t\cos 314t$$

第二章　变压器的基本作用原理及理论分析

p42:2-1

设有一台 500kVA、三相、 35000/400V 双绕组变压器，一、二次绕组均系星形连接，试求高压方面和低压方面的额定电流。

解：

$$I_{1N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{500KVA}{\sqrt{3}\times 35000V}=8.248A$$

$$I_{2N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{500KVA}{\sqrt{3}\times 400V}=721.7A$$

p42:2-2

设有一台 16MVA；三相；110/11kv；Yd 连接的双绕组变压器（表示一次三相绕组接成星形、二次三相绕组接成三角形）。试求高、低压两侧的额定线电压、线电流和额定相电压、相电流。

解：已知 $\begin{array}{l} S_N=S_{1N}=S_{2N}=16MVA \\ U_{1N}=110KV, U_{2N}=11KV \end{array}$

$$I_{1N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{16MVA}{\sqrt{3}\times 110KV}=83.98A$$

$$I_{2N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{16MVA}{\sqrt{3}\times 11KV}=839.8A$$

高压侧 Y 连接：

相电流=线电流：$I_{1PN}=I_{1N}=83.98A$

线电压=$\sqrt{3}$ 相电压，$U_{1pN}=\frac{U_{1N}}{\sqrt{3}}=\frac{110KV}{\sqrt{3}}=63.51KV$

低压侧三角形接：

相电压=线电压：$U_{2pN}=U_{2N}=11KV$

线电流=$\sqrt{3}$ 相电流，$I_{2pN}=\frac{I_{2N}}{\sqrt{3}}=484.87A$

p42:2-3

设有一台 500kVA、50Hz、三相变压器、Dyn 连接（上列符号的意义为一次绕组接成三角形，二次绕组接成星形并有中线引出），额定电压为 10000/400V（上列数字的意义为一次额定线电压 10000V，二次额定线电压为 400V，以后不加说明，额定电压均指线电压）；

（1） 试求一次额定线电流及相电流，二次额定线电流；

（2） 如一次每相绕组的线圈有 960 匝，问二次每相绕组的线圈有几匝？每匝的感应电动势为多少？

（3） 如铁芯中磁通密度的最大值为 1.4T，求该变压器铁芯的截面积；

（4） 如在额定运行情况下绕组的电流密度为 $3A/\mathrm{mm}^2$，求一、二次绕组各应有的导线截面。

解：（1） 一次绕组三角形连接，线电压等于相电压 $U_{1N1}=U_{1N\psi}=10000\,\mathrm{V}$

额定线电流 $$I_{1N1}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{500\times10^3}{\sqrt{3\times10000}}=28.87(A)$$

额定相电流 $$I_{1N\psi}=\frac{I_{1N1}}{\sqrt{3}}=\frac{28.87}{\sqrt{3}}=16.67(A)$$

二次绕组 Y 连接，额定线电流等于额定相电流

$$I_{2N1}=I_{2N\psi}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{500\times10^3}{\sqrt{3}\times400}=721.71(A)$$

（2） 二次相电压 $U_{2N\psi}=\dfrac{U_{2N}}{\sqrt{3}}=\dfrac{400}{\sqrt{3}}\approx231$

$$K=\frac{N_1}{N_2}=\frac{U_{1N\psi}}{U_{2N\psi}}$$ 所以

$$N_2=\frac{N_{2N\psi}\times N_1}{N_{1N\psi}}=\frac{231\times960}{10000}\approx22(\text{匝})$$

每匝的感应电动势 $\mathrm{e}=\dfrac{U_{2N\psi}}{N_2}=\dfrac{231}{22}=10.5$ （V）

(3) $U_{1N}=4.44\mathrm{f}N_1\Phi_{\mathrm{m}}$ $\Phi_{\mathrm{m}}=B_{\mathrm{m}}S$

所以截面积 $S=\dfrac{U_{1N}}{4.44fN_1B_m}=\dfrac{10000}{4.44\times50\times960\times1.4}=3.35\times10^{-2}\left(m^2\right)$

一次绕组导线截面积 $S_1=\dfrac{I_{1N\psi}}{\rho}=\dfrac{16.67}{3}=5.557\times10^{-6}$（$m^2$）

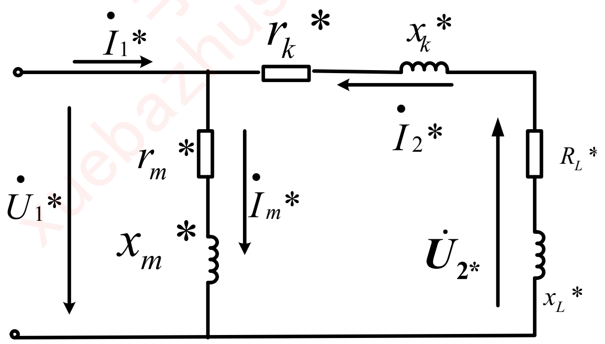
二次绕组导线截面积 $S_2=\dfrac{I_{2N\psi}}{\rho}=\dfrac{721.71}{3}=2.406\times10^{-4}$（$m^2$）

p42:2-4

设有一 2kVA、50Hz、1100/110V、单相变压器，在高压侧测得下列数据：短路阻抗 $Z_k=30\Omega$，短路电阻 $r_k=8\Omega$；在额定电压下的空载电流的无功分量为 0.09A，有功分量为 0.01A。二次电压保持在额定值。接至二次的负载为 10Ω 的电阻与 5Ω 的感抗相串联。

（1）试作出该变压器的近似等效电路，各种参数均用标幺值表示；

（2）试求一次电压 U_{1*} 和一次电流 I_{1*}。



解：（1） 短路电抗 $x_k=\sqrt{z_k^2-r_k^2}=\sqrt{30^2-8^2}\approx29(\Omega)$

高压侧阻抗基值 $Z_{1b}=\dfrac{U_{1N}^2}{S_N}=\dfrac{1100^2}{2\times10^3}=605(\Omega)$

低压侧阻抗基值 $Z_{2b}=\dfrac{U_{2N}^2}{S_N}=\dfrac{110^2}{2\times10^3}=6.05(\Omega)$

短路电阻标幺值 $r_{k*}=\dfrac{r_k}{Z_{1b}}=\dfrac{8}{605}=0.0132$

短路电抗标幺值 $\mathbf{x_{k*} = \frac{x_k}{Z_{1b}} = \frac{29}{605} = 0.0479}$

$$Z_m = r_m + jx_m = \frac{\dot{U}_{1N}}{\dot{I}_0} = \frac{1100}{0.01 - j0.09} = 1342 + j12080\Omega$$

$$r_m{}^* = \frac{r_m}{Z_{1b}} = \frac{1342}{605} = 2.22$$

$$x_{m*} = \frac{x_m}{Z_{1b}} = \frac{12080}{605} = 19.96 \approx 20.0$$

负载电阻标幺值 $\mathbf{R_{L*} = \frac{R_L}{Z_{2b}} = \frac{10}{6.05} = 1.653}$

负载感抗标幺值 $\mathbf{X_{L*} = \frac{X_L}{Z_{2b}} = \frac{5}{6.05} = 0.8264}$

（2） 设二次电压 $\mathbf{\dot{U}_{2*} = 1\angle 0^0}$ 所以

$$\mathbf{\dot{I}_{2*} = \frac{\dot{U}_{2*}}{R_{L*} + jX_{L*}} = \frac{1\angle 0^0}{1.653 + j0.8264} = 0.5411\angle -26.56^0}$$

$$\mathbf{\dot{U}_{1*} = -\dot{I}_{2*}(Z_{k*} + Z_{L*}) = -0.5411\angle -26.56^0 \times (0.0132 + j0.0478) + 1\angle 0^0 = -1.0181\angle 1.12^0}$$

$$\mathbf{\dot{I}_{1*} = \dot{I}_{m*} - \dot{I}_{2*} = \frac{\dot{U}_{1*}}{Z_{m*}} - \dot{I}_{2*} = \frac{-1.0181\angle 1.12^0}{2.22 + j19.96} - 0.5411\angle -26.56^0 = 0.571\angle 149.2^0}$$

所以 $U_{1*} = 1.0181$ $I_{1*} = 0.571$

或（2）设 $-\dot{U}_2{}^* = 1\angle 0°$

$$-\dot{I}_2{}^* = \frac{-\dot{U}_2{}^*}{R_L{}^* + jx_L{}^*} = \frac{1}{1.653 + j0.826} = 0.541\angle -26.55^o\ A$$

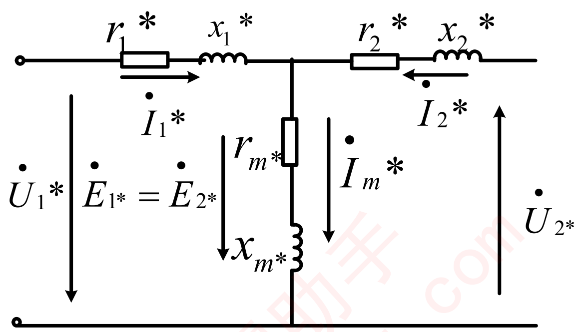
$$\dot{U}_1{}^* = -\dot{I}_2{}^*(r_k{}^* + jx_k{}^* + R_L{}^* + jx_L{}^*)$$
$$= 0.541\angle -26.55^o(0.0132 + j0.0478 + 1.653 + j0.826)$$
$$= 1.018\angle 1.12^o V$$

$$\dot{I}_0{}^* = \frac{\dot{U}_1{}^*}{r_m{}^* + jx_m{}^*} = \frac{1.018\angle 1.12^o}{2.22 + j20} = 0.051\angle -82.55^o$$

$$\dot{I}_1{}^* = -\dot{I}_2{}^* + \dot{I}_0{}^* = 0.541\angle -26.55^o + 0.051\angle -82.55^o = 0.571\angle -30.77^o$$

p42:2-5

设有一台 10kVA、2200/220V、单相变压器，其参数如下 $r_1 = 3.6\Omega$，$r_2 = 0.036\Omega$，$x_k = x_1 + x_2' = 26\Omega$；在额定电压下的铁芯损耗 $p_{Fe} = 70w$，空载电流 I_0 为额定电流的 5%。假设一、二次绕组的漏抗如归算到同一方时可作为相等，试求（1）各参数的标幺值，并绘出该变压器的 T 形等效电路；（2）设变压器二次电压和二次电流为额定值，且有 $\cos\theta_2 = 0.8$ 滞后功率因数，求一次电压和电流。



解：（1）$Z_{1b} = Z_{1N} = \dfrac{U_{1N}^2}{S_{1N}} = \dfrac{2200^2}{10000} = 484\Omega$

$$Z_{2b} = Z_{1N} = \frac{U_{2N}^2}{S_{2N}} = \frac{220^2}{10000} = 4.84\Omega$$

$$\dot{I}_0* = 0.05, \dot{U}_1* = 1$$

$$r_m = \frac{P_{Fe}}{I_0^2} = \frac{P_{Fe}}{(0.05I_{1N})^2} = \frac{P_{Fe}}{(0.05\dfrac{S_N}{U_{1N}})^2} = 1355.2\Omega$$

$$Z_m* = \frac{\dot{U}_1*}{\dot{I}_0*} = \frac{1}{0.05} = 20$$

$$r_m* = \frac{r_m}{Z_{1b}} = \frac{1355.2}{484} = 2.8$$

$$x_m* = \sqrt{Z_m*^2 - r_m*^2} = \sqrt{20^2 - 2.8^2} = 19.8$$

$$r_1* = \frac{r_1}{Z_{1b}} = \frac{3.6}{484} = 0.00744$$

$$r_2{}^* = \frac{r_2}{Z_{2b}} = \frac{0.036}{4.84} = 0.00744$$

$$x_k{}^* = \frac{x_k}{Z_{1b}} = \frac{26}{484} = 0.05372$$

$$x_1{}^* = x_2{}^* = 0.5x_k{}^* = 0.5 \times 0.05372 = 0.0269$$

（2）设二次电$\dot{U}_{2*} = 1\angle 0^0$，则$\dot{I}_{2*} = 1\angle -36.87^0$

$$\begin{aligned}\dot{E}_{1*} = \dot{E}_{2*} &= \dot{U}_{2*} + \dot{I}_{2*}(r_{2*} + jx_{2*}) \\ &= 1\angle 0° + 1\angle -36.87°(0.00744 + j0.0269) = 1.022\angle 0.956°\end{aligned}$$

$$-\dot{I}_{m*} = \frac{\dot{E}_{1*}}{r_{m*} + jx_{m*}} = \frac{1.022\angle 0.956°}{2.8 + j19.8} = 0.05112\angle -80.99°$$

$$\dot{I}_{1*} = \dot{I}_{m*} - \dot{I}_{2*} = -0.05112\angle -80.99° - 1\angle -36.87° = 1.037\angle 141.2°$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{1*} &= \dot{I}_{1*}(r_{1*} + jx_{1*}) - \dot{E}_{1*} \\ &= 1.037\angle 141.2°(0.00744 + j0.0269) - 1.022\angle 0.956° = 1.046\angle -178.1°\end{aligned}$$

$$U_1 = U_{1*} \cdot U_{1N} = 1.046 \times 2200 = 2301.2V$$

$$I_1 = I_{1*} \cdot I_{1N} = 1.037 \times \frac{10000}{2200} = 4.714A$$

p43:2-7

设有一台 1800kVA、10000/400V，Yyn 连接的三相铁芯式变压器。短路电压 $u_k = 4.5\%$。在额定电压下的空载电流为额定电流的 4.5%，即 $I_0 = 0.045I_N$，在额定电压下的空载损耗 $p_0 = 6800w$，当有额定电流时的短路铜耗 $p_{kN} = 22000w$。试求：

（1）当一次电压保持额定值，一次电流为额定值且功率因数 0.8 滞后时的二次电压和电流。

（2）根据（1）的计算值求电压变化率，并与电压变化率公式的计算值相比较。

解：（1） $I_N = \dfrac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \dfrac{1800KVA}{\sqrt{3} \times 1KV} = 103.9A$

$$Z_k=\frac{\frac{U_k}{\sqrt{3}}}{I_k}=\frac{0.045\times 10000/\sqrt{3}}{103.9}=2.5\Omega$$

$$r_k=\frac{P_k}{3I_k{}^2}=\frac{22000}{3\times 103.9^2}=0.679\Omega$$

$$x_k=\sqrt{Z_k{}^2-r_k{}^2}=\sqrt{2.5^2-0.0679^2}=2.406\Omega$$

$$I_0=0.045I_N=0.045\times 103.9=4.6755A$$

$$r_m=\frac{P_0}{3I_0^2}=\frac{6800}{3\times 4.6755^2}=103.6\Omega$$

$$Z_m=\frac{(U_{1N}/\sqrt{3})}{I_0}=\frac{10000}{\sqrt{3}\times 4.6755}=1234.8\Omega$$

$$x_m=\sqrt{Z_m{}^2-r_m{}^2}=\sqrt{1234.8^2-103.6^2}=1230.2\Omega$$

设：$\dot{U}_{1N}=10000\angle 30^o V$,则相电压$\dot{U}_1=\frac{10000}{\sqrt{3}}\angle 0^o V$

$$\dot{I}_{1N}=103.9\angle\arccos 0.8=103.9\angle -36.87^o A$$

$$\dot{I}_0=\frac{\dot{U}_1}{r_m+jx_m}=4.677\angle -85.20^o A$$

$$-\dot{I}_2'=\dot{I}_{1N}-\dot{I}_0=103.9\angle -36.87^o-4.677\angle -85.20^o=100.87\angle -34.46^o A$$

$$I_2=KI_2'=\frac{10000}{400}\times 100.87=2521.75A$$

$$-\dot{U}_2'=\dot{U}_1-\dot{U}_k=\dot{U}_1-[-\dot{I}_2'(r_k+jx_k)]=5579.9\angle -161.36^o V$$

$$U_2=\frac{U_2'}{K}=\frac{5579.9}{25}=223.2V$$

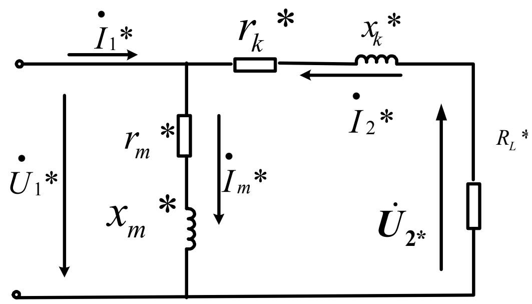
（2） 相电压$U_2=\frac{400}{\sqrt{3}}=230.95V$

$$\Delta U\%=\frac{230.95-223.2}{230.95}\times 100\%=3.35\%$$

计算:$\Delta U\%=\frac{I_{1N}r_k\cos\theta+I_{1N}x_k\sin\theta}{U_1}\times 100$

$$=\frac{103.9\times0.679\times0.8+103.9\times2.406\times0.6}{10000/\sqrt{3}}\times100=3.57\%$$

2-8：



解：$I_{1N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{320\times10^3}{\sqrt{3}\times6300}=29.33A$

$$I_{2N}=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}=\frac{320\times10^3}{\sqrt{3}\times400}=461.88A$$

$$Z_{2N}=\frac{U_{2N\phi}}{I_{2N\phi}}=\frac{U_{2N}}{\frac{I_{2N}}{\sqrt{3}}}=\frac{U_{2N}}{\frac{S_N}{\sqrt{3}\sqrt{3}U_{2N}}}=\frac{3U_{2N}^2}{S_N}=\frac{3\times400^2}{320\times10^3}=1.5\Omega\text{（d接）}$$

（1）空载时，$U_0=U_N$,则$U_{0*}=1$，计算激磁阻抗：

$$z_{m*}=\frac{1}{I_{0*}}=\frac{1}{\frac{27.7}{461.88}}=16.67$$

$$r_{m*}=\frac{p_{0*}}{I_{0*}^2}=\frac{1.45/320}{\left(\frac{27.7}{461.88}\right)^2}=1.259$$

$$x_{m*}=\sqrt{z_{m*}^2-r_{m*}^2}=16.62$$

短路时，$I_k=I_N$,则$I_{k*}=1$，计算短路阻抗：

$$z_{k*}=u_{k*}=\frac{284}{6300}=0.04508$$

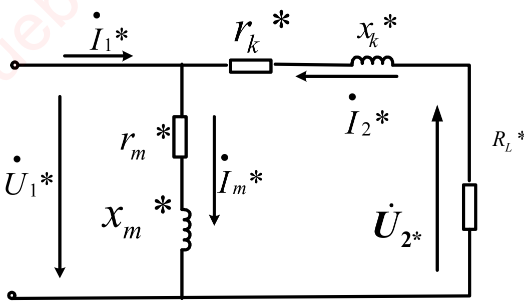
$$r_{k*}=p_{k*}=\frac{5.7}{320}=0.01781$$

$$x_{k*}=\sqrt{z_{k*}^2-r_{k*}^2}=0.04139$$

（2）$Y\to\Delta$：$R\to3R$ 则：$R_{L*}=\frac{3R}{Z_{2N}}$

$U_{1*}=1$，且$I_{2*}=1$由图可得：

$$\left.\begin{aligned}&\frac{U_{1*}}{I_{2*}}=\sqrt{\left(r_{k*}+R_{L*}\right)^2+x_{k*}{}^2}\\&\frac{1}{1}=\sqrt{\left(0.01781+R_{L*}\right)^2+0.04139^2}\\&R_{L*}=0.9813\end{aligned}\right\}\Rightarrow R=\frac{R_{L*}\cdot Z_{2N}}{3}=\frac{0.9813\times1.5}{3}=0.49$$



2-9：

解：（1）空载时，$\mathbf{U_0=U_N}$,则$\mathbf{U_{0*}=1}$，计算激磁阻抗：

$$z_{m*}=\frac{1}{I_{0*}}=\frac{1}{0.02}=50$$

$$r_{m*}=\frac{\mathrm{p}_{0*}}{I_{0*}^2}=\frac{133/125000}{0.02^2}=2.66$$

$$x_{m*}=\sqrt{z_{m*}^2-r_{m*}^2}=49.93$$

短路时，$I_k=I_N$,则$\mathbf{I}_{k*}=1$，计算短路阻抗：

$$z_{k*}=u_{k*}=0.105$$

$$r_{k*}=p_{kN*}=\frac{600}{125000}=0.0048$$

$$x_{k*}=\sqrt{z_{k*}^2-r_{k*}^2}=0.1049$$

（2）设$\dot{U}_{2*}=1\angle0°$，则$\dot{\mathbf{I}}_{2*}=1\angle-36.87°$

$$\dot{U}_{1*}=-\dot{U}_{2*}-\dot{I}_{2*}\left(r_{k*}+jx_{k*}\right)=-1\angle0°-1\angle-36.87°(0.0048+j0.1049)$$
$$=1.0699\angle-175.7°$$

$$\dot{I}_{1*}=\dot{I}_{m*}-\dot{I}_{2*}=\frac{1.0699\angle-175.7^\circ}{2.66+j49.93}--1\angle-36.87^\circ=1.015\angle142.26^\circ$$

（3） $\Delta U=(U_{1*}-1)\times100\%=(1.0699-1)\times100\%=6.99\%$

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}=\frac{U_{2*}I_{2*}\cos\theta_2}{U_{1*}I_{1*}\cos\theta_1}=\frac{1\times1\times\cos36.87^\circ}{1.0699\times1.015\times\cos(-175.7-142.26)^\circ}=99.27\%$$

实用公式：

$$\Delta U=\beta(r_{k*}\cos\theta_2+x_{k*}sin\theta_2)\times100\%$$
$$=1(0.0048\times0.8+0.1049\times0.6)\times100\%=6.678\%$$

$$\eta=\frac{\beta S_N\cos\theta_2}{\beta S_N\cos\theta_2+p_0+\beta^2P_{KN}}=\frac{1\times125000\times0.8}{1\times125000\times0.8+133+1^2\times600}=99.27\%$$

（4）当 $\beta=\beta'=\sqrt{\frac{p_0}{P_{kN}}}=\sqrt{\frac{133}{600}}=0.471$ 时，有最大效率：

$$\eta_{\max}=\frac{\beta' S_N\cos\theta_2}{\beta' S_N\cos\theta_2+p_0+\beta'^2P_{KN}}=\frac{0.471\times125000\times0.8}{0.471\times125000\times0.8+133+0.471^2\times600}=99.44\%$$

2-11：

设有一台 50kVA，50Hz，6300/400V,Yy 连接的三相铁芯式变压器。空载电流 $I_0=0.075I_N$，空载损耗 $p_0=350W$，短路电压 $u_{k*}=0.055$，短路损耗 $p_{KN}=1300$W。（最好用标么值，并与下面方法比较）

（1）试求该变压器在空载时的参数 r_0 和 x_0，以及短路参数 r_k、x_k，所有参数均归算到高压侧，作出该变压器的近似等效电路；

（2）试求该变压器在供给额定电流且 $\cos\theta_2=0.8$ 滞后时的电压变化率及效率

解

（1）

$$I_N=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}=\frac{50KVA}{\sqrt{3}\times6300V}=4.58A$$

$$Z_0=Z_m=\frac{U_1}{I_0}=\frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{0.075I_N}=10584\Omega$$

$$r_0=\frac{P_0}{3I_0{}^2}=\frac{350}{3\times(0.075\times1.58)^2}=988\Omega \qquad r_0{}^*=1.24$$

$$x_0=\sqrt{Z_0^2-r_0^2}=\sqrt{10584^2-988^2}=10534\Omega \qquad x_0{}^*=13.2$$

$$U_k=0.055\times6300/\sqrt{3}=200V$$

$$I_k=I_{1N}=4.58A$$

$$Z_k=\frac{U_k}{I_k}=\frac{200}{4.58}=43.67$$

$$r_k=\frac{P_k}{3I_N{}^2}=\frac{1300}{3\times4.58^2}=20.66 \qquad r_k{}^*=0.026$$

$$x_k=\sqrt{Z_k^2-r_k^2}=\sqrt{43.67^2-20.66^2}=38.47\Omega \qquad x_k{}^*=0.0485$$

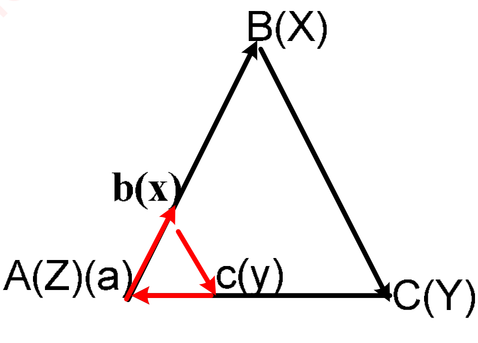
（2）

$$\Delta U\%=\frac{I_{1N}r_k\cos\theta_2+I_{1N}x_k\sin\theta_2}{U_1}\times100$$

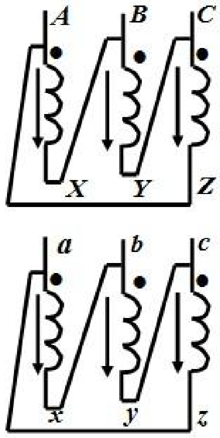
$$=\frac{4.58\times20.66\times0.8+4.58\times38.47\times0.6}{6300/\sqrt{3}}\times100=4.99\%$$

$$\eta=\frac{\beta S_N\cos\theta_2}{\beta S_N\cos\theta_2+\beta^2P_{KN}+P_0}=\frac{50000\times0.8}{50000\times0.8+1300+350}=96\%$$

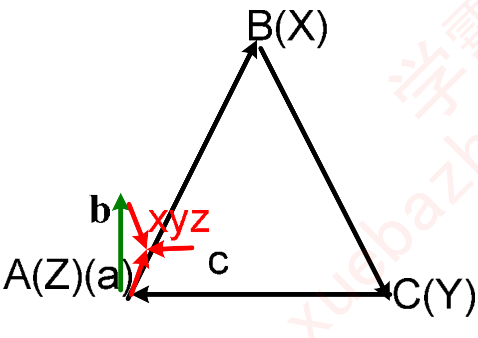
p54：3-1



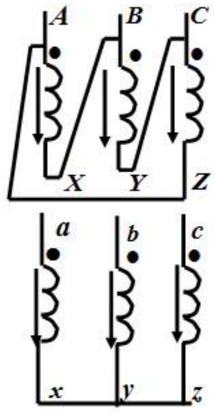
Dd0

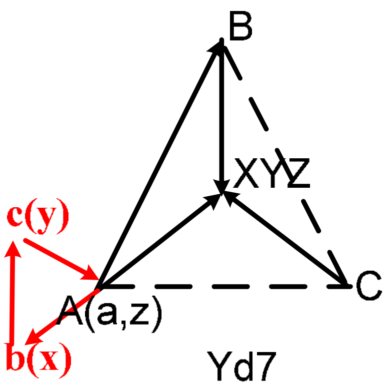


Dy11

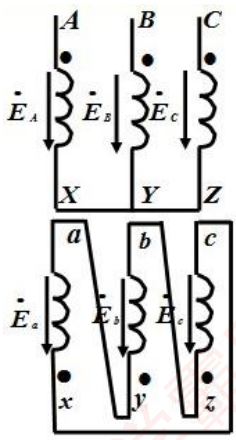


Dy11

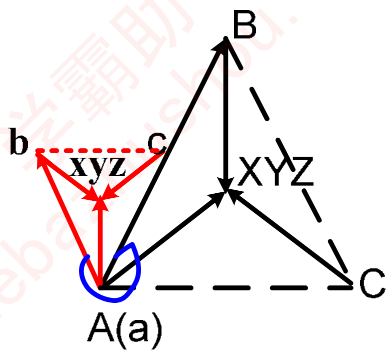




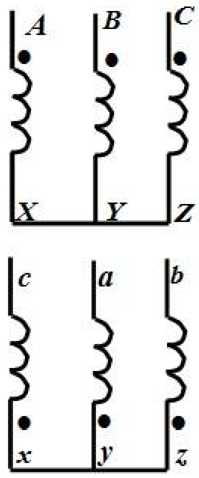
Yd7



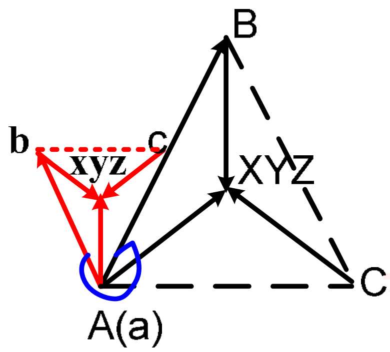
Yy10



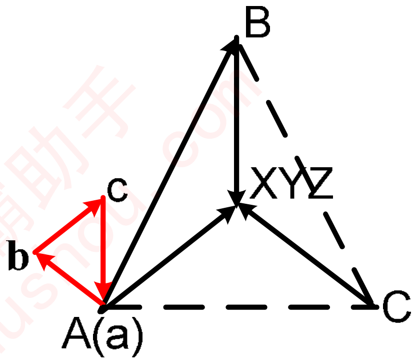
Yy10



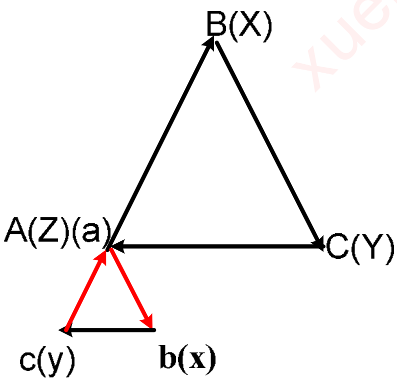
p54：3-2



Yy10



Yd9



Dd4

p54：3-4 解：

（1）$$u_{kI*}=z_{kI*}=\frac{z_{kI}}{z_{1NI}}=\frac{250/32\sqrt{3}}{6300^2/500\times10^3}=0.0568$$

$$u_{kII*}=z_{kII*}=\frac{z_{kII}}{z_{1NII}}=\frac{300/82\sqrt{3}}{6300^2/1000\times10^3}=0.0532$$

（2）$$\left.\begin{array}{l}\dfrac{S_I}{S_{II}}=\dfrac{500/1000}{0.0568/0.0532}=0.468\\ S_I+S_{II}=1200kVA\end{array}\right\}\Rightarrow S_I=382kVA,S_{II}=818kVA$$

（3）从比值$\frac{S_I}{S_{II}}=\frac{500/1000}{0.0568/0.0532}=0.468$看：$S_{II}$大，为了使两台变压器都不超过额定电压，则变压器 II 先满载。

$$\left.\begin{array}{l}\dfrac{S_I}{S_{II}}=\dfrac{500/1000}{0.0568/0.0532}=0.468\\ S_{II}=1000kVA\end{array}\right\}\Rightarrow S_I=468kVA\text{则}S_{总}=S_I+S_{II}=1468kVA$$

（4）绕组中的电流，即为相电流（注二次绕组为 d 接）

$$I_{\text{I}2\phi}=\frac{I_{\text{I}2}}{\sqrt{3}}=\frac{382\times10^3}{3\times400}=318A$$

$$I_{\text{II}2\phi}=\frac{I_{\text{II}2}}{\sqrt{3}}=\frac{818\times10^3}{3\times400}=682A$$

P69:4-1

解：（1）二次空载时对称：变压器结构和参数相同，二次空载时，一次绕组通过三相对称空载电流，产生三相对称磁通，在二次的感应电动势相同且对称，即一、二次侧相、线电压对称。

（2）二次接对称负载时：同一次电流对称、磁通对称，二次感应感应电动势相同且对称，所以一、二次侧相、线电压对称。

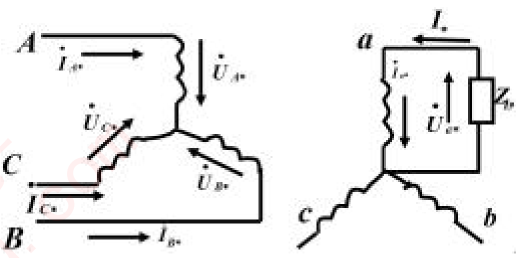
（3）假设 a 相接负载：

$$r_{m*}=\frac{p_{0*}}{I_{0*}^2}=\frac{1}{0.05^2}=4，\quad Z_{m*}=\frac{1}{0.05}=20$$

$$x_{m*}=\sqrt{z_{m*}^2-r_{m*}^2}=\sqrt{20^2-4^2}=19.6$$

$$z_{k*}=u_{k*}=0.05，\quad r_{k*}=u_{a*}=0.02$$

$$x_{k*}=\sqrt{z_{k*}^2-r_{k*}^2}=\sqrt{0.05^2-0.02^2}=0.046$$



①边界条件：$\dot{I}_{a*}=\dot{I}_*$，$\dot{I}_{b*}=\dot{I}_{c*}=0$，$\dot{U}_{a*}=\dot{I}_* Z_{L*}$.

②a 相序电流：
$$\begin{cases}\dot{I}_{a+*}=\frac{1}{3}(\dot{I}_{a*}+a\dot{I}_{b*}+a^2\dot{I}_{c*})=\frac{1}{3}\dot{I}_* \\ \dot{I}_{a-*}=\frac{1}{3}(\dot{I}_{a*}+a^2\dot{I}_{b*}+a\dot{I}_{c*})=\frac{1}{3}\dot{I}_* \\ \dot{I}_{a0*}=\frac{1}{3}(\dot{I}_{a*}+\dot{I}_{b*}+\dot{I}_{c*})=\frac{1}{3}\dot{I}_*\end{cases}$$

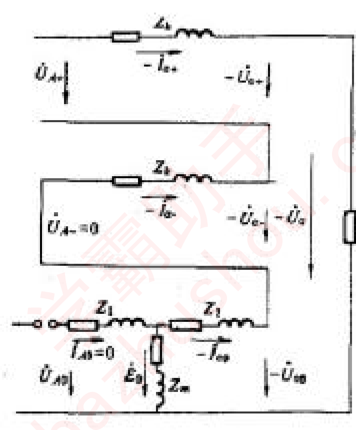
③各序网络图（可直接画总图，该题中用标么值表示）有：

$$-\dot{U}_{a*}=\dot{U}_{A+*}+(\dot{I}_{a+*}+\dot{I}_{a-*})Z_{k*}+\dot{I}_{a0*}(Z_{2*}+Z_{m0*})$$

同理：
$$-\dot{U}_{b*}=\dot{U}_{B+*}+(\dot{I}_{b+*}+\dot{I}_{b-*})Z_{k*}+\dot{I}_{b0*}(Z_{2*}+Z_{m0*})$$

$$-\dot{U}_{c*}=\dot{U}_{C+*}+(\dot{I}_{c+*}+\dot{I}_{c-*})Z_{k*}+\dot{I}_{c0*}(Z_{2*}+Z_{m0*})$$

④由图可得：



Y，yn单相负载时的等效电路

$$\dot{I}_{a+*}=\dot{I}_{a-*}=\dot{I}_{a0*}=-\dot{I}_{A+*}=-\dot{I}_{A-*}=-\frac{\dot{U}_{A+*}}{2z_{k*}+z_{2*}+z_{m0*}+3R_{L*}}$$

$$=-\frac{1\angle 0^{\circ}}{2(0.02+j0.046)+\frac{1}{2}(0.02+j0.046)+4+j19.6+3}$$

$$=0.04767\angle 109.7^{\circ}$$

$$\dot{I}_{*}=3\dot{I}_{a+*}=0.143\angle 109.7^{\circ}$$

⑤二次侧相（线）电流：$\dot{I}_{a*}=\dot{I}_{*}=0.143\angle 109.7^{\circ},\dot{I}_{b*}=\dot{I}_{c*}=0$

一次侧相（线）电流（注：无零序）：

$$\dot{I}_{A*}=\dot{I}_{A+*}+\dot{I}_{A-*}=-\dot{I}_{a+*}-\dot{I}_{a-*}=-\frac{2}{3}\times 0.143\angle 109.7^{\circ}=0.095\angle -70.3^{\circ}$$

$$\dot{I}_{B*}=\dot{I}_{B+*}+\dot{I}_{B-*}=-a^{2}\dot{I}_{a+*}-a\dot{I}_{a-*}=\frac{1}{3}\times 0.143\angle 109.7^{\circ}=0.04767\angle 109.7^{\circ}$$

$$\dot{I}_{B*}=\dot{I}_{C+*}+\dot{I}_{C-*}=-a\dot{I}_{a+*}-a^{2}\dot{I}_{a-*}=\frac{1}{3}\times 0.143\angle 109.7^{\circ}=0.04767\angle 109.7^{\circ}$$

二次侧相电压(不对称)：

$$-\dot{U}_{a*}=\dot{U}_{A+*}+(\dot{I}_{a+*}+\dot{I}_{a-*})Z_{k*}+\dot{I}_{a0*}(Z_{2*}+Z_{m0*})$$

$$\text{或}=-\dot{I}_{*}\cdot R_{L*}=-0.143\angle 109.7^{\circ}=-0.143\angle 70.3^{\circ}$$

同理：$-\dot{U}_{b*}=\dot{U}_{B+*}+(\dot{I}_{b+*}+\dot{I}_{b-*})Z_{k*}+\dot{I}_{b0*}(Z_{2*}+Z_{m0*})$

$$=1\angle -120^{\circ}+(a+a^{2})\dot{I}_{a0*}Z_{k*}+\dot{I}_{a0*}(Z_{2*}+Z_{m*})$$

$$=1.756\angle -145.23^{\circ}$$

$$-\dot{U}_{c*}=\dot{U}_{C+*}+(\dot{I}_{c+*}+\dot{I}_{c-*})Z_{k*}+\dot{I}_{c0*}(Z_{2*}+Z_{m0*})=1.1617\angle 153.1^{\circ}$$

一次侧相电压(不对称)：

$$\dot{U}_{A*}\approx-\dot{U}_{a*}=0.143\angle -70.3^{\circ}$$

$$\dot{U}_{B*}\approx-\dot{U}_{b*}=1.756\angle -145.23^{\circ}$$

$$\dot{U}_{c*}\approx-\dot{U}_{c*}=1.617\angle 153.1^{\circ}$$

一、二次侧线电压(对称)：

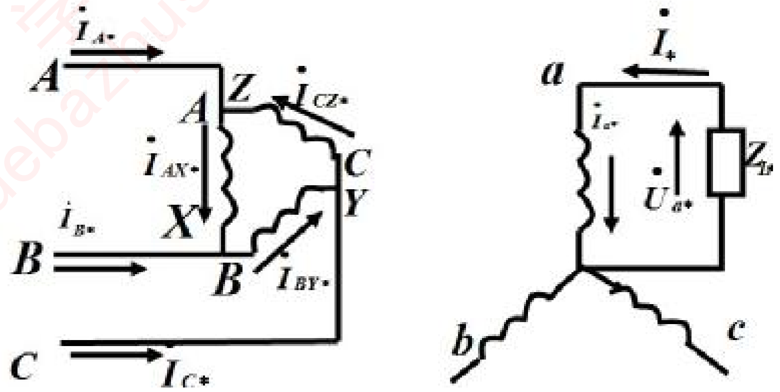
$$\dot{U}_{AB*}\approx-\dot{U}_{ab*}=1.724\angle 30.18^{\circ}$$

$$\dot{U}_{BC*}\approx-\dot{U}_{bc*}=1.733\angle -90.01^{\circ}$$

$$\dot{U}_{cA*}\approx-\dot{U}_{ca*}=1.724\angle 149.83^{\circ}$$

4-2

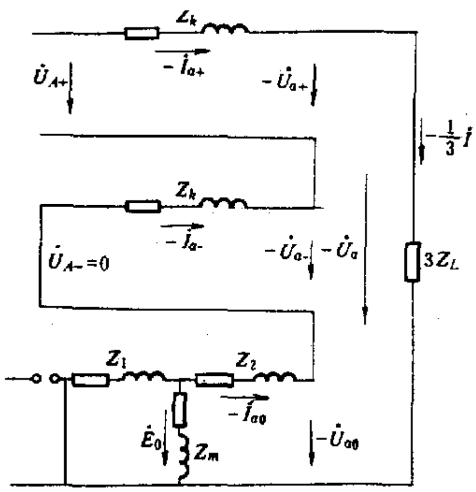
(3) 假设 D/yn11，假设 a 相接负载（参数计算同上）：



①边界条件：$\dot{I}_{a*}=\dot{I}_{*}$， $\dot{I}_{b*}=\dot{I}_{c*}=0$， $\dot{U}_{a*}=\dot{I}_{*}Z_{L*}$.

②a 相序电流：$\begin{cases}\dot{I}_{a+*}=\dfrac{1}{3}(\dot{I}_{a*}+a\dot{I}_{b*}+a^{2}\dot{I}_{c*})=\dfrac{1}{3}\dot{I}_{*}\\ \dot{I}_{a-*}=\dfrac{1}{3}(\dot{I}_{a*}+a^{2}\dot{I}_{b*}+a\dot{I}_{c*})=\dfrac{1}{3}\dot{I}_{*}\\ \dot{I}_{a0*}=\dfrac{1}{3}(\dot{I}_{a*}+\dot{I}_{b*}+\dot{I}_{c*})=\dfrac{1}{3}\dot{I}_{*}\end{cases}$

③各序网络图（可直接画总图，该题中用标么值表示）有



$$-\dot{U}_{a*}=\dot{U}_{A+*}+(\dot{I}_{a+*}+\dot{I}_{a-*})Z_{k*}+\dot{I}_{a0*}(Z_{2*}+Z_{m0*}\|Z_{1*})$$

同理：$-\dot{U}_{b*}=\dot{U}_{B+*}+(\dot{I}_{b+*}+\dot{I}_{b-*})Z_{k*}+\dot{I}_{b0*}(Z_{2*}+Z_{m0*}\|Z$

$-\dot{U}_{c*}=\dot{U}_{C+*}+(\dot{I}_{c+*}+\dot{I}_{c-*})Z_{k*}+\dot{I}_{c0*}(Z_{2*}+Z_{m0*}\|Z$

④由图可得：

$$\dot{I}_{a+*}=\dot{I}_{a-*}=\dot{I}_{a0*}=-\dot{I}_{A+*}=-\dot{I}_{A-*}=-\frac{\dot{U}_{A+*}}{2z_{k*}+z_{2*}+(Z_{m0*}\|Z_{1*})+3R_{L*}}$$

$$=-\frac{1\angle 0^{\circ}}{2(0.02+j0.046)+\frac{1}{2}(0.02+j0.046)+(4+j19.6)\|(\frac{0.02+j0.046}{2})+3}$$

$=0.3263\angle 177.43$

$\dot{I}_{*}=3\dot{I}_{a+*}=0.979\angle 177.43^{\circ}$

⑤二次侧相（线）电流：$\dot{I}_{a*}=\dot{I}_{*}=0.979\angle 177.43^{\circ},\dot{I}_{b*}=\dot{I}_{c*}=0$

一次侧相电流（直接写，D 内为零序通路）：

$$\dot{I}_{A*}=-\dot{I}_{a*}=0.979\angle-2.57°$$

$$\dot{I}_{BY*}=-\dot{I}_{b*}=0$$

$$\dot{I}_{CZ*}=-\dot{I}_{c*}=0$$

一次侧线电流：

$$\dot{I}_{A*}=\dot{I}_{AX*}-\dot{I}_{CZ*}=0.979\angle-2.57°-0=0.979\angle-2.57°$$

$$\dot{I}_{B*}=\dot{I}_{BY*}-\dot{I}_{AX*}=0-0.979\angle-2.57°=0.979\angle177.43°$$

$$\dot{I}_{C*}=\dot{I}_{CZ*}-\dot{I}_{BY*}=0-0=0$$

二次侧相电压(不对称)：

$$-\dot{U}_{a*}=\dot{U}_{A+*}+(\dot{I}_{a+*}+\dot{I}_{a-*})Z_{k*}+\dot{I}_{a0*}(Z_{2*}+Z_{m0*}\|Z_{1*})$$

$$\text{或}=-\dot{I}_{*}\cdot R_{L*}=-0.979\angle177.43°=0.979\angle-2.57°$$

同理：$$-\dot{U}_{b*}=\dot{U}_{B+*}+(\dot{I}_{b+*}+\dot{I}_{b-*})Z_{k*}+\dot{I}_{b0*}(Z_{2*}+Z_{m0*}\|Z_{1*})$$

$$=1\angle-120°+(a+a^2)\dot{I}_{a0*}Z_{k*}+\dot{I}_{a0*}(Z_{2*}+Z_{m*}\|Z_{1*})$$

$$\approx1\angle-120°$$

$$-\dot{U}_{c*}=\dot{U}_{C+*}+(\dot{I}_{c+*}+\dot{I}_{c-*})Z_{k*}+\dot{I}_{c0*}(Z_{2*}+Z_{m*}\|Z_{1*})=\approx1\angle120°$$

一次侧相电压(不对称)：

$$\dot{U}_{A*}\approx-\dot{U}_{a*}=0.979\angle-2.57°$$

$$\dot{U}_{B*}\approx-\dot{U}_{b*}=1\angle-120°$$

$$\dot{U}_{c*}\approx-\dot{U}_{c*}=1\angle120°$$

一、二次侧线电压(对称)：

$$\dot{U}_{AB*}\approx-\dot{U}_{ab*}=1.691\angle29.08°$$

$$\dot{U}_{BC*}\approx-\dot{U}_{bc*}=1.730\angle-90°$$

$$\dot{U}_{cA*}\approx-\dot{U}_{ca*}=1.736\angle148.38°$$

4-3

（a）~(d)共同特点：原边均有零序通路，相电流含零序分量，所以，该题均不用对称分量法，直接用变比即可。

解（a）边界条件：$\dot{I}_a=\dot{I}=1A$，$\dot{I}_b=\dot{I}_c=0A$

可直接由变比求：$\dot{I}_A = -\frac{\dot{I}_a}{k} = -0.5A$，$\dot{I}_B = \dot{I}_C = -\frac{\dot{I}_b}{k} = -\frac{\dot{I}_c}{k} = 0A$

也可用对称分量法解如下：
副边对称分量电流，简化等值电路

$$\dot{I}_{a+} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c) = \frac{1}{3}\dot{I}_a$$

$$\dot{I}_{a-} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) = \frac{1}{3}\dot{I}_a$$

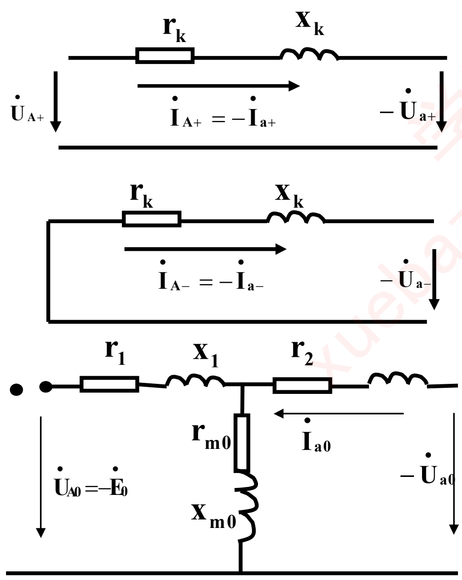
$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = \frac{1}{3}\dot{I}_a$$

由等值电路，原边电流(零序电流不能流通)：

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A+} + \dot{I}_{A-} + \dot{I}_{A0} = -(\dot{I}_{a+} + \dot{I}_{a-} + \dot{I}_{a0}) = -\dot{I}_a = -\frac{1}{2}\text{A}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B+} + \dot{I}_{B-} + \dot{I}_{B0} = -(a^2\dot{I}_{a+} + a\dot{I}_{a-} + \dot{I}_{a0}) = 0$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C+} + \dot{I}_{C-} + \dot{I}_{C0} = -(a\dot{I}_{a+} + a^2\dot{I}_{a-} + \dot{I}_{a0}) = 0$$



（b）边界条件：$\dot{I}_{ax} = \frac{2}{3}\dot{I} = \frac{2}{3}A$，$\dot{I}_{by} = \dot{I}_{cz} = -\frac{1}{3}\dot{I} = -\frac{1}{3}A$

可直接由变比求：$\dot{I}_A = -\frac{\dot{I}_{ax}}{k} = -\frac{1}{3}A$，$\dot{I}_B = \dot{I}_C = -\frac{\dot{I}_{by}}{k} = -\frac{\dot{I}_{cz}}{k} = \frac{1}{6}A$

（c）边界条件：$\dot{I}_{ax} = \frac{2}{3}\dot{I} = \frac{2}{3}A$，$\dot{I}_{by} = \dot{I}_{cz} = -\frac{1}{3}\dot{I} = -\frac{1}{3}A$

可直接由变比求：$\dot{I}_{AX} = -\frac{\dot{I}_{ax}}{k} = -\frac{1}{3}A$，$\dot{I}_{BY} = -\frac{\dot{I}_{by}}{k} = \frac{1}{6}A$，$\dot{I}_{CZ} = -\frac{\dot{I}_{cz}}{k} = \frac{1}{6}A$

线电流：$\dot{I}_A=\dot{I}_{AX}-\dot{I}_{CZ}=-\frac{1}{3}-\frac{1}{6}=-\frac{1}{2}A$，$\dot{I}_B=\dot{I}_{BY}-\dot{I}_{AX}=\frac{1}{6}+\frac{1}{3}=\frac{1}{2}A$

$\dot{I}_C=\dot{I}_{CZ}-\dot{I}_{BY}=\frac{1}{6}-\frac{1}{6}=0A$

（d）边界条件：$\dot{I}_a=\dot{I}=1A$，$\dot{I}_b=\dot{I}_c=0A$

可直接由变比求：$\dot{I}_{AX}=-\frac{\dot{I}_a}{k}=-0.5A$，$\dot{I}_{BY}=\dot{I}_{CZ}=-\frac{\dot{I}_b}{k}=-\frac{\dot{I}_c}{k}=0A$

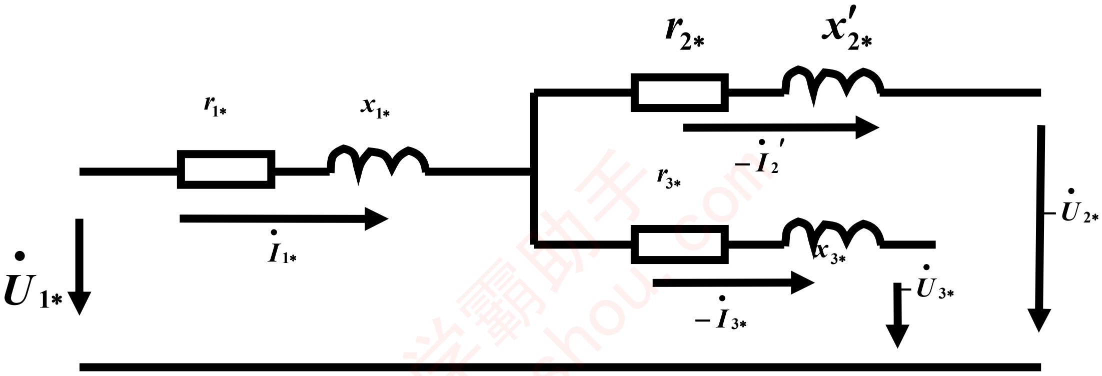
线电流：$\dot{I}_A=\dot{I}_{AX}-\dot{I}_{BY}=-\frac{1}{2}-0=-\frac{1}{2}A$，$\dot{I}_B=\dot{I}_{BY}-\dot{I}_{CZ}=0-0=0A$

$\dot{I}_C=\dot{I}_{CZ}-\dot{I}_{AX}=0-(-\frac{1}{2})=0.5A$

P83：例题

例：一台型号为 SFSL1-20000/110 的三相三绕组变压器，YNynod11 连接，额定电压为 121/38.5/11kV；高压、中压、低压绕组的容量分别为 20000kVA、20000kVA、10000kVA；最大短路损耗为 151kW；归算到高压侧的短路电压标幺值为 u_{k12*}=0.105，u_{k13*}=0.18，u_{k23*}=0. 065，试求其等效电路中的各个参数（励磁电流略去不计）。

解：简化等效电路图如下图所示：



由题已知：$r_{k12}{*}=P_{k12}{*}=\dfrac{151}{20000}=0.00755$，$r_1{*}=r_2{*}=\dfrac{1}{2}r_3{*}$

$r_{k12}{*}=r_1{*}+r_2{*}$

$r_1{*}=r_2{*}=0.003775$；

$r_3{*}=0.00755$；

$$Z_{k12}{*}=\frac{U_{k12}{*}}{I_{k12}{*}}=\frac{0.105}{1}=0.105$$

$$\text{则}x_{k12}{*}=\sqrt{Z_{k12}{*}^2-r_{k12}{*}^2}=\sqrt{0.105^2-0.00755^2}=0.1047$$

$$Z_{k13}{*}=\frac{U_{k13}{*}}{I_{k13}{*}}=\frac{0.18}{1}=0.18$$

$$r_{k13}{*}=r_1{*}+r_3{*}=0.011325$$

$$\text{则}x_{k13}{*}=\sqrt{Z_{k13}{*}^2-r_{k13}{*}^2}=\sqrt{0.18^2-0.011325^2}=0.1796$$

$$Z_{k23}{}^* = \frac{U_{k23}{}^*}{I_{k23}{}^*} = \frac{0.065}{1} = 0.065$$

$$r_{k23}{}^* = r_2{}^* + r_3{}^* = 0.011325$$

$$\text{则} x_{k23}{}^* = \sqrt{Z_{k23}{}^{*2} - r_{k23}{}^{*2}} = \sqrt{0.065^2 - 0.011325^2} = 0.064$$

$$x_1{}^* = \frac{x_{k12}{}^* + x_{k13}{}^* - x_{k23}{}^*}{2} = 0.11$$

$$x_2{}^* = \frac{x_{k12}{}^* + x_{k23}{}^* - x_{k13}{}^*}{2} = -0.00545$$

$$x_3{}^* = \frac{x_{k13}{}^* + x_{k23}{}^* - x_{k12}{}^*}{2} = 0.069$$

$$Z_1{}^* = r_1{}^* + jx_1{}^* = 0.00378 + j0.11$$

$$Z_2{}^* = r_2{}^* + jx_2{}^* = 0.00378 - j0.00545$$

$$Z_3{}^* = r_3{}^* + jx_3{}^* = 0.00775 + j0.069$$

$$Z_{1b} = Z_{1N} = \frac{U_{1N}{}^2}{S_N} = 732.07$$

$$Z_1 = Z_1{}^* Z_{1b} = 2.77 + j80.53\Omega = r_1 + jx_1$$

$$Z_2 = Z_2{}^* Z_{1b} = 2.77 - j3.99\Omega = r_2 + jx_2$$

$$Z_3 = Z_3{}^* Z_{1b} = 5.53 + j50.51\Omega = r_3 + jx_3$$

p83：5-1

需明白求所量 u_{k*} 或 $u_k = \frac{U_{kN}}{U_N}$，即短路电流为额定电流时的短路电压标幺值。经验证表中短路试验，$I_{k13} = I_{1N}$，其它 $I_k \neq I_N$

选择基值：电压电流以各次额定电压电流为基值，容量以 $S_N = 15000kVA$ 为基值。

$$u_{k12} = Z_{k12*} = \frac{Z_{k12}}{Z_{1N}} = \frac{11\times 10^3 / 38.2\sqrt{3}}{121^2 / 15000\times 10^3} = 17.03\%$$

$$u_{k13} = Z_{k13*} = \frac{12.7}{11} = 10.49\%$$

$$u'_{k23}=u_{k23*}=Z_{k23*}=\frac{Z_{k23}}{Z_{2N}}=\frac{1.54\times10^3/150\sqrt{3}}{38.5^2/15000\times10^3}=6.0\%$$

$$u_{a12}=r_{k12*}=\frac{p_{k12*}}{I_{k12*}^2}=\frac{39/15000\times10^3}{\left(\frac{38.2}{15000/121\sqrt{3}}\right)^2}=0.91\%$$

$$u_{a13}=r_{k13*}=\frac{p_{k13*}}{I_{k13*}^2}=\frac{132}{15000\times10^3}=0.879\%$$

$$u'_{a23}=u'_{a23*}=r_{k23*}=\frac{p_{k23*}}{I_{k23*}^2}=\frac{54/15000\times10^3}{\left(\frac{150}{15000/38.5\sqrt{3}}\right)^2}=0.81\%$$

（2）分离各电阻电抗按如下公式：

$$r_{1*}=\frac{r_{k12*}+r_{k13*}-r_{k23*}}{2}=0.0049\qquad x_{1*}=\frac{x_{k12*}+x_{k13*}-x_{k23*}}{2}=0.1075$$

$$r_{2*}=\frac{r_{k12*}+r_{k23*}-r_{k13*}}{2}=0.0042\qquad x_{2*}=\frac{x_{k12*}+x_{k23*}-x_{k13*}}{2}=0.0625$$

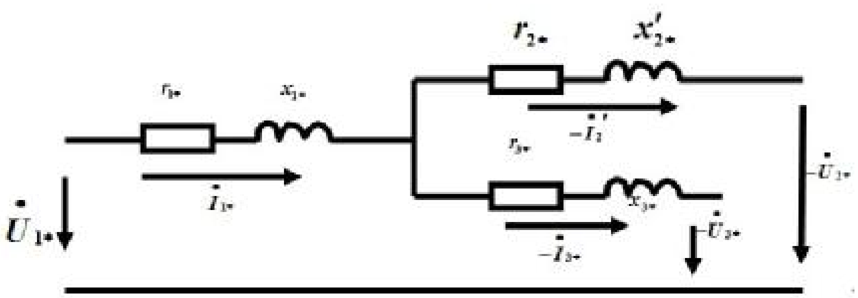
$$r_{3*}=\frac{r_{k13*}+r_{k23*}-r_{k12*}}{2}=0.0039\qquad x_{3*}=\frac{x_{k13*}+x_{k23*}-x_{k12*}}{2}=-0.003$$

$$Z_{m*}=\frac{U_{30*}}{I_{30*}}=\frac{1}{31.6/\left(15000/11\sqrt{3}\right)}=24.9$$

$$r_{m*}=\frac{p_{30*}}{I_{30*}^2}=\frac{60/15000}{\left[31.6/\left(15000/11\sqrt{3}\right)\right]^2}=2.48$$

$$x_{m*}=\sqrt{Z_{m*}^2-r_{m*}^2}=24.79$$

（3）等效电路：



p83：5-2

解：该自藕变压器变比：$K_A=\dfrac{10/\sqrt{3}+3.15}{10/\sqrt{3}}=1.546$

（1） 自藕变压器额定容量和绕组容量之比：

$$\frac{S_{AN}}{S_{axN}}=\frac{K_A}{K_A-1}=2.832$$

（3）$u_K=0.055$

$$u_a*=\frac{P_{KN}}{S_N}=\frac{16400}{1250\times10^3}=0.01312$$

$$u_r*=\sqrt{u_k*^2-u_a*^2}=\sqrt{0.055^2-0.01312^2}=0.0534$$

$$\Delta U\%=\beta\left(u_{a*}\cos\theta_2+u_{r*}\sin\theta_2\right)$$
$$=0.8\times\left(0.01312\times0.8+0.05341\times0.6\right)=0.03403$$

电压变化率：$\Delta U_A\%=\dfrac{K_A-1}{K_A}\cdot\Delta U\%=1.2\%$

$$S_{AN}=\frac{K_A}{K_A-1}S_N=\frac{1.546}{1.546-1}\times1250=3539.4kVA$$

$$\eta=\frac{\beta S_{AN}\cos\theta_2}{\beta S_{AN}\cos\theta_2+p_0+\beta^2p_{kN}}$$
$$=\frac{0.8\times3539.4\times0.8\times10^3}{0.8\times3539.4\times0.8\times10^3+2350+16400\times0.8^2}=99.44\%$$

p83：5-3

解：由题可知：双绕组变压器额定容量S_N即为自耦变压器的绕组容量，即

$$S_N=(1-\frac{1}{k_A})S_{NA}，\quad z_{kA*}=(1-\frac{1}{k_A})z_{k*}$$

但由于是升压变压器，则公式变为$S_N=(1-k_A)S_{NA}$，$z_{kA*}=(1-k_A)z_{k*}$

（1） $K_A=\dfrac{2400}{2460}=\dfrac{1}{1.1}$

$U_{1NA} = 2400V$， $U_{2NA} = 2640V$

$$S_{NA} = \frac{S_N}{(1-k_A)} = \frac{50}{(1-\frac{1}{1.1})} = 550kVA；$$

额定电流 $I_{1NA} = \frac{S_{NA}}{U_{1NA}} = \frac{550\times10^3}{2400} = 229.2A$

$$I_{2NA} = \frac{S_{NA}}{U_{2NA}} = \frac{550\times10^3}{2640} = 208.3A$$

（2） 绕组容量与额定容量之比：$\frac{S_{绕组}}{S_{NA}} = \frac{S_N}{S_{NA}} = 1-k_A = 0.09091$

（3） 经验证双绕组短路试验和空载条件是在 $U_0 = U_{2N}, I_k = I_{1N}$ 额定条件下进行的：

$$z_{k*} = u_{k*} = \frac{48}{2400} = 0.02$$

$$r_{k*} = p_{k*} = \frac{617}{50000} = 0.012$$

$$x_{k*} = \sqrt{z_{k*}^2 - r_{k*}^2} = \sqrt{0.02^2 - 0.012^2} = 0.016$$

由于 $z_{kA*} = (1-k_A)z_{k*}$， $\Delta U = \beta(r_{k*}\cos\theta_2 + x_{k*}\sin\theta_2)$ 则

$$\Delta U_A = (1-k_A)\Delta U = (1-\frac{1}{1.1})(0.012\times1+0) = 0.112\%$$

$$\eta = \frac{\beta S_{AN}\cos\theta_2}{\beta S_{AN}\cos\theta_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}}$$

$$= \frac{\frac{1\times1\times50\times10^3}{0.09091}}{\frac{1\times1\times50\times10^3}{0.09091} + 186 + 617} = 99.84\%$$

第六章　交流电机绕组及其感应电动势

P102：6-2

有一三相电机，Z=36，2P=4， $y=\frac{7}{9}\tau$ ，a=1，双层叠绕组，试求：

（1）绕组因数 KN1，KN5，KN7；
（2）画出槽导体电动势星形图；
（3）画出绕组展开图。

解：（1）$每极每相槽数q=\frac{Z}{2Pm}=\frac{36}{4\times 3}=3$

$$槽距角\alpha=\frac{180^\circ}{mq}=\frac{180^\circ}{3\times 3}=20^\circ$$

$$短距角\beta=(1-\frac{7}{9})\times 180^\circ=40^\circ$$

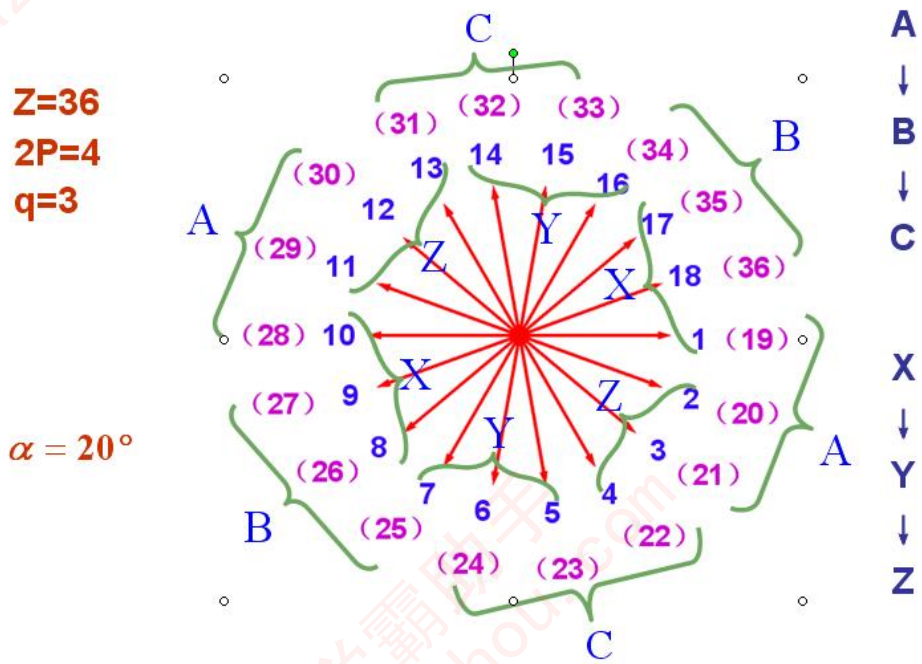
$$绕组因数k_{N\nu}=k_{d\nu}\cdot k_{p\nu}=\frac{\sin\frac{\nu q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\nu\alpha}{2}}\bullet\cos\frac{\nu\beta}{2},(\nu=1,5,7)$$

$$\nu=1时,k_{N1}=\frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}\bullet\cos\frac{\beta}{2}=\frac{\sin\frac{3\times 20^\circ}{2}}{3\sin\frac{20^\circ}{2}}\bullet\cos\frac{40^\circ}{2}=0.902$$

$$\nu=5时,k_{N5}=\frac{\sin\frac{5\times 3\times 20^\circ}{2}}{3\sin\frac{5\times 20^\circ}{2}}\bullet\cos\frac{5\times 40^\circ}{2}=-0.038$$

$$v=7时,k_{N7}=\frac{\sin\frac{7\times3\times20^\circ}{2}}{3\sin\frac{7\times20^\circ}{2}}\bullet\cos\frac{7\times40^\circ}{2}=0.136$$

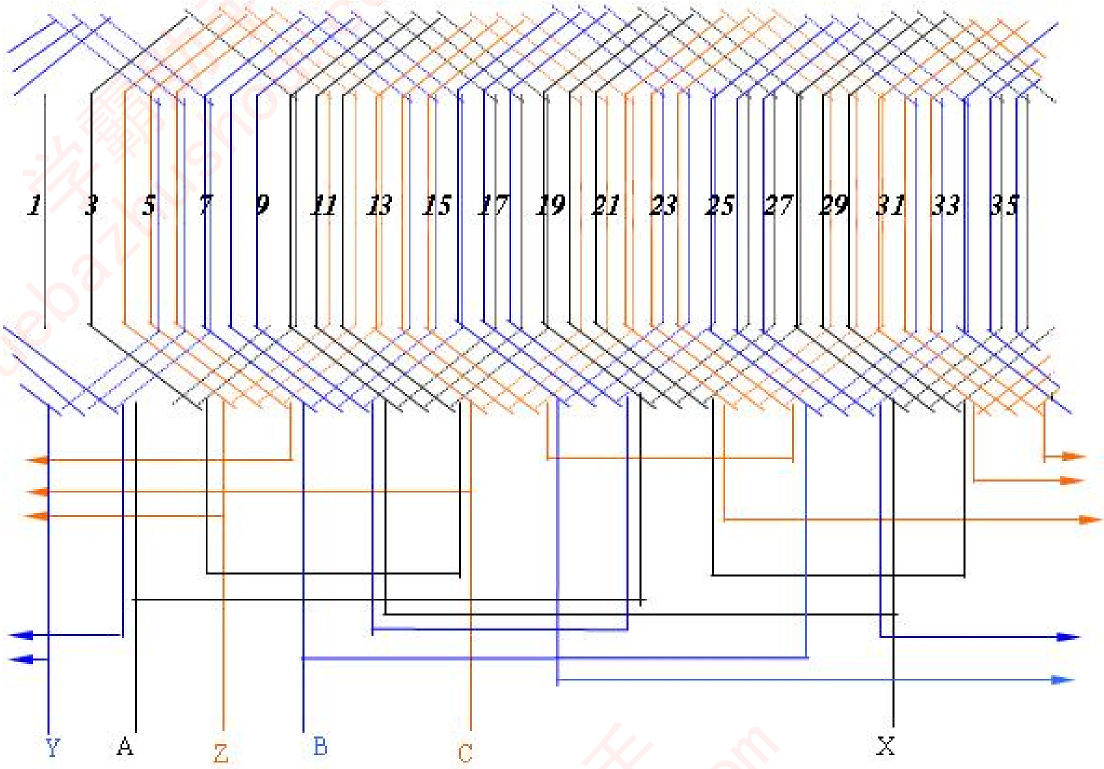
（2）画出槽导体电动势星形图；



各个相带的槽号分布

相带 / 槽号 / 极对	A	Z	B	X	C	Y
第一对极下（1槽~18槽）	1,2,3 10,11,12	11,12,13 2,3,4	7,8,9 16,17,18	8,9,10 17,18,19	13,14,15 4,5,6	14,15,16 5,6,7
第二对极下（19槽~36槽）	19,20,21 28,29,30	20,21,22 29,30,31	25,26,27 34,35,36	26,27,28 35,36,1	22,23,24 31,32,33	23,24,25 32,33,34

（4） 画出绕组展开图。



P102：6-3

有一三相电机，Z=48，2P=4，a=1，每相导体数 N=96，f=50Hz，双层短距绕组，星形接法，每极磁通 $\phi_1 = 1.115\times10^{-2}Wb$，$\phi_3 = 0.365\times10^{-2}Wb$，$\phi_5 = 0.24\times10^{-2}Wb$，$\phi_7 = 0.093\times10^{-2}Wb$. 试求：

（1）力求削弱 5 次和 7 次谐波电动势，节距 y 应选多少？

（2）此时每相电动势 E_ϕ；

（3）此时的线电动势 E_l.

解：$$每极每相槽数q = \frac{Z}{2Pm} = \frac{48}{4\times3} = 4$$

$$槽距角\alpha = \frac{180°}{mq} = \frac{180°}{3\times4} = 15°$$

（1） 为削弱ν次谐波 $y = (1-\frac{1}{\nu})\tau_P$------（$P_{104}$）

则为削弱 5 次谐波：$y=\frac{4}{5}\tau_p$，削弱 7 次谐波：$y=\frac{6}{7}\tau_p$

要同时削弱 5 次和 7 次谐波 $y=\frac{5}{6}\tau_p=\frac{5}{6}\times\frac{48}{4}=10$

（2） $短距角\beta=(1-\frac{5}{6})\times180°=30°$，或 $\beta=(\tau_p-y)\times\alpha=30°$

$$绕组因数k_{N\nu}=k_{d\nu}\cdot k_{p\nu}=\frac{\sin\frac{\nu q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\nu\alpha}{2}}\bullet\cos\frac{\nu\beta}{2},(\nu=1,5,7)$$

$$\nu=1时,k_{N1}=\frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}\bullet\cos\frac{\beta}{2}=\frac{\sin\frac{4\times15°}{2}}{4\sin\frac{15°}{2}}\bullet\cos\frac{30°}{2}=0.925$$

$$\nu=5时,k_{N5}=\frac{\sin\frac{5\times4\times15°}{2}}{4\sin\frac{5\times15°}{2}}\bullet\cos\frac{5\times30°}{2}=0.053$$

$$\nu=7时,k_{N7}=\frac{\sin\frac{7\times4\times15°}{2}}{4\sin\frac{7\times15°}{2}}\bullet\cos\frac{7\times15°}{2}0.041$$

（3） $E_{\varphi1}=4.44f_1K_{N1}N\Phi_1=4.44\times50\times0.925\times96\times1.115\times10^{-2}=219.8V$

$E_{\varphi5}=4.44f_5K_{N5}N\Phi_5=4.44\times250\times0.053\times96\times0.24\times10^{-2}=13.55V$

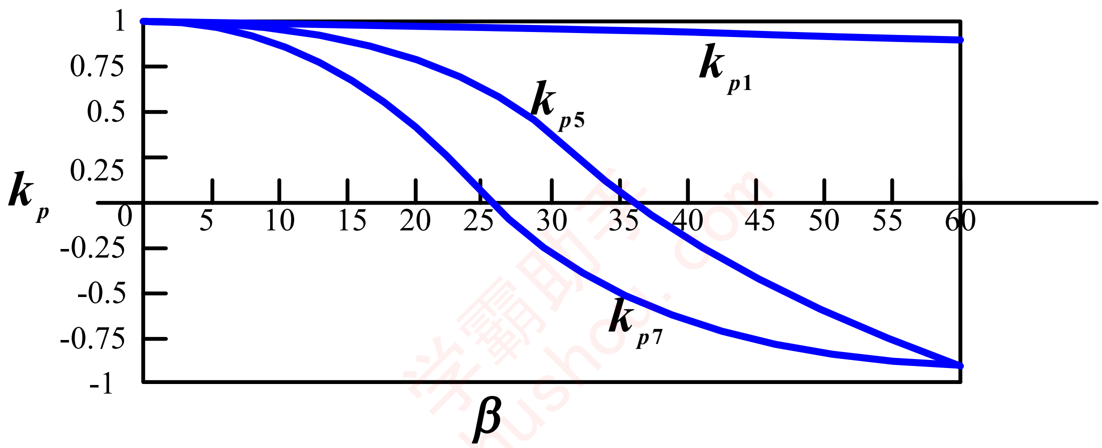
$E_{\varphi7}=4.44f_7K_{N7}N\Phi_7=4.44\times350\times0.041\times96\times0.093\times10^{-2}=5.689V$

$E_l=\sqrt{3}\sqrt{E_{\varphi1}^2+E_{\varphi5}^2+E_{\varphi7}^2}=381.6V$

P105：6-9

试分析三相绕组节距因数与短距角之间的关系。画出基波、五次谐波和七次谐波 $k_{p\nu}=f(\beta)$ 之间的曲线。（$\beta=0°\sim60°$）

解：$k_{p\nu}=\cos\dfrac{\nu\beta}{2},(\nu=1,5,7)$。当 $\beta=0°\sim60°$，相应节距因数的关系曲线如下图所示。当短距角变化时，基波的节距因数变化很小，5 次和 7 次谐波的节距因数有过零点，即在某个短距角可使得 5 次或 7 次谐波完全消除。如需同时削弱 5 次和 7 次谐波应在图示的两过零点之间选择一个合适的角度，使绕组的节距为整槽数。



第七章　交流绕组的磁动势

P121：7-2

设有一三相电机，6 极，双层绕组，星形接法，Z=54，y=7 槽，$N_c=10$，绕组中电流 $f=50Hz$，输入电流有效值 $I=16A$，试求：旋转磁势的基波、5 次、7 次谐波分量的振幅及转速、转向。

解：$$每极每相槽数q=\frac{Z}{2Pm}=\frac{54}{6\times3}=3$$

$$槽距角\alpha=\frac{180°}{mq}=\frac{180°}{3\times3}=20°$$

$$短距角\beta=(\tau_p-y)\times\alpha=(\frac{54}{6}-7)\times20°=40°$$

$$每相绕组总的串联匝数\ N=\frac{2pqN_c}{a}=2\times3\times3\times10=180$$

$$绕组因数k_{N\nu}=k_{d\nu}\cdot k_{p\nu}=\frac{\sin\frac{\nu q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\nu\alpha}{2}}\bullet\cos\frac{\nu\beta}{2},(\nu=1,5,7)$$

$$\nu=1时,k_{N1}=\frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}\bullet\cos\frac{\beta}{2}=\frac{\sin\frac{3\times20°}{2}}{3\sin\frac{20°}{2}}\bullet\cos\frac{40°}{2}=0.9019$$

$$\nu=5时,k_{N5}=\frac{\sin\frac{5\times3\times20°}{2}}{3\sin\frac{5\times20°}{2}}\bullet\cos\frac{5\times40°}{2}=-0.03778$$

$$v=7时,k_{N7}=\frac{\sin\frac{7\times3\times20°}{2}}{3\sin\frac{7\times20°}{2}}\bullet\cos\frac{7\times40°}{2}=0.1356$$

基波磁动势幅值：$$F_1=\frac{3}{2}F_{m1}=\frac{3}{2}\times0.9\times\frac{NK_{N1}}{P}I$$
$$=\frac{3}{2}\times0.9\times\frac{180\times0.9019}{3}\times16=1168.9A$$

基波转速： $n_1=\frac{60f}{P}=\frac{60\times50}{3}=1000r/\min$ （正向）

5 次谐波磁动势幅值：$$F_5=\frac{3}{2}F_{m5}=\frac{3}{2}\times0.9\times\frac{NK_{N5}}{5P}I$$
$$=\frac{3}{2}\times0.9\times\frac{180\times0.03778}{5\times3}\times16=9.793A$$

5 次谐波转速： $n_5=\frac{60f}{5P}=\frac{60\times50}{5\times3}=200r/\min$ （反向）

7 次谐波磁动势幅值：$$F_7=\frac{3}{2}F_{m7}=\frac{3}{2}\times0.9\times\frac{NK_{N7}}{7P}I$$
$$=\frac{3}{2}\times0.9\times\frac{180\times0.1356}{7\times3}\times16=25.11A$$

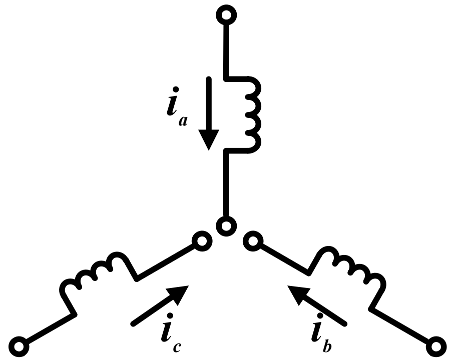
7 次谐波转速： $n_7=\frac{60f}{7P}=\frac{60\times50}{7\times3}=143r/\min$ （正向）

P121：7-3

设有一 4 极三相交流电机，星形接法，$50Hz$，定子绕组为双层对称绕组 $q=3$，$N_c=4$，线圈跨距 y=7 槽，试问流入三相电流为下列各种情况时所产生的磁动势，求出磁动势的性质和基波振幅。

$$(1)\begin{cases} i_a = 100\sqrt{2}\sin\omega t \\ i_b = 100\sqrt{2}\sin(\omega t - 120°) \\ i_b = 100\sqrt{2}\sin(\omega t + 120°) \end{cases} \qquad (4)\begin{cases} i_a = 100\sqrt{2}\sin\omega t \\ i_b = -50\sqrt{2}\sin(\omega t - 60°) \\ i_b = -86\sqrt{2}\sin(\omega t + 30°) \end{cases}$$

$$(2)\begin{cases} i_a = 100\sqrt{2}\sin\omega t \\ i_b = 100\sqrt{2}\sin\omega t \\ i_b = 100\sqrt{2}\sin\omega t \end{cases}$$



三相电流通入三相绕组中

$$(3)\begin{cases} i_a = 100\sqrt{2}\sin\omega t \\ i_b = -100\sqrt{2}\sin\omega t \\ i_b = 0 \end{cases}$$

解：（1）圆形旋转磁动势（正序）

$$槽距角\alpha = \frac{180°}{mq} = \frac{180°}{3\times3} = 20°$$

$$短距角\beta = (\tau_P - y)\times\alpha = (3\times3-7)\times20° = 40°$$

$$每相绕组总的串联匝数\ N = \frac{2pqN_c}{a} = 2\times2\times3\times4 = 48$$

$$k_{N1} = \frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}\bullet\cos\frac{\beta}{2} = \frac{\sin\frac{3\times20°}{2}}{3\sin\frac{20°}{2}}\bullet\cos\frac{40°}{2} = 0.9019$$

合成磁势：

$$F_1 = \frac{3}{2}F_{m1} = \frac{3}{2}\times0.9\times\frac{NK_{N1}}{P}I$$

$$= \frac{3}{2}\times0.9\times\frac{48\times0.9019}{2}\times100 = 2922.2A$$

（2）合成磁动势为零

（3）合成磁动势为脉动磁势

$$f_a = F_{m1}\sin\omega t\cdot\sin x$$
$$f_b = -F_{m1}\sin\omega t\cdot\sin(x-120°)$$
$$f_c = 0$$
$$\begin{aligned} f_1 = f_a + f_b + f_c &= F_{m1}[\sin\omega t\cdot\sin x - \sin\omega t\cdot\sin(x-120°)] \\ &= \sqrt{3}F_{m1}\sin\omega t\cdot\sin(x+30°) \\ &= \frac{1}{2}F_{m1}[\cos(\omega t - x) - \cos(\omega t - x + 120°)] \\ &\quad -\frac{1}{2}F_{m1}[\cos(\omega t + x) - \cos(\omega t + x - 120°)] \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2}F_{m1}[\cos(\omega t - x - 30°) - \cos(\omega t + x + 30°)] \end{aligned}$$
$$F_1 = \sqrt{3}F_{m1} = 3374A$$
（4）椭圆形磁势

$$\dot{I}_{a+} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c) = 28.8\angle 30°$$
$$\dot{I}_{a-} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) = 76\angle -10.8°$$
$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = 47\angle -44.9°$$

正序电流$\dot{I}_{a+}$产生正序旋转磁动势，幅值F_+

$$F_+ = \frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{NK_{N1}}{P}I_{a+} = \frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{48\times 0.9019}{2}\times 28.8 = 841.6A$$

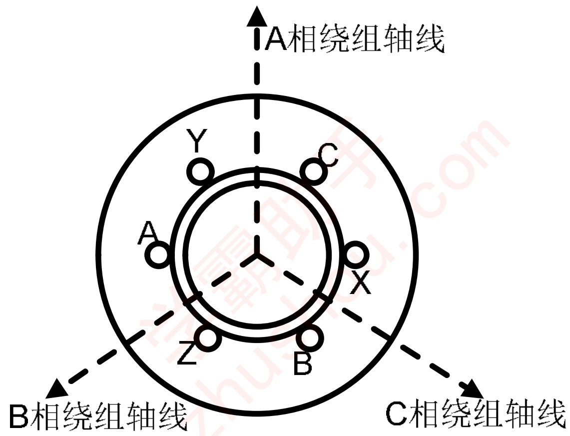
正序电流$\dot{I}_{a-}$产生正序旋转磁动势，幅值F_-

$$F_- = \frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{NK_{N1}}{P}I_{a-} = \frac{3}{2}\times 0.9\times\frac{48\times 0.9019}{2}\times 76 = 2220.8A$$

零序电流$\dot{I}_{a0}$产生合成磁动势为零

P123：7-7

三相对称绕组流入三相对称电流$\begin{cases} i_a = 100\sqrt{2}\sin\omega t \\ i_b = 100\sqrt{2}\sin(\omega t - 120°) \\ i_b = 100\sqrt{2}\sin(\omega t + 120°) \end{cases}$试求：（1）当$\omega t = 0°$时，三相合成磁势基波分量幅值的位置；（2）$\omega t = 120°$时，三相合成磁势基波分量幅值的位置；（3）$\omega t = 240°$时，三相合成磁势基波分量幅值的位置。A 相、B 相、C 相绕组等效线圈如图所示。



解：$f_1 = f_A + f_B + f_C = \frac{3}{2}F_{m1}\cos(\omega t - x)$，（要选正方向）

（1）当$\omega t = 0°$时，三相合成磁势基波分量幅值的位置在 x=0 处；

（2）$\omega t = 120°$时，三相合成磁势基波分量幅值的位置在 x=120° 处；

（3）$\omega t = 240°$时，三相合成磁势基波分量幅值的位置在 x=240° 处。

第九章　异步电机的理论分析与运行特性

P160：9-1

设有一台 50Hz，六极三相异步电动机，额定数据：$P_N = 7.5KW$，$n_N = 964r/\min$，$U_N = 380V$，$I_N = 16.4A$，$\cos\theta_N = 0.78$，求额定时效率。

解：转差率 $s_N = \dfrac{n_1 - n}{n_1} = \dfrac{1000-964}{1000} = 0.036$

输入 $P_1 = \sqrt{3}U_N I_N \cos\theta_N = \sqrt{3}\times 380\times 16.4\times 0.78 = 8419W$

电动机效率 $\eta = \dfrac{P_2}{P_1} = \dfrac{7500}{8419} = 89.08\%$

P160：9-2

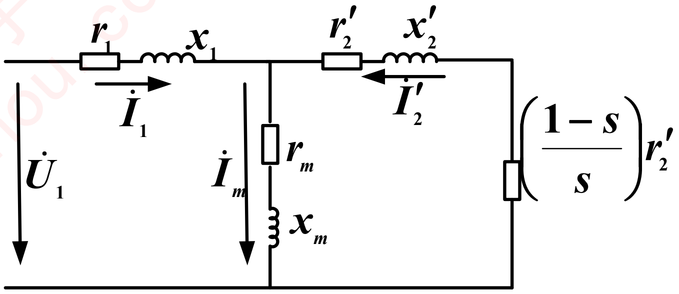
设有一台 50Hz，四极三相异步电动机，请填空：

$n(r/\min)$	1540	1470	0	1500	-600
S	-0.027	0.002	1	0	1.4
f_2（Hz）	-1.35	1	50	0	70
工作状态	发电机	电动机	静止/启动	理想空载	电磁制动

P162：9-5

设有一台 $3000V$、6 极、$50Hz$、$975r/\min$ 的星接三相感异步电动机，每相参数如下：$r_1 = 0.42\Omega$，$x_1 = 2.0\Omega$，$r_2' = 0.45\Omega$，$x_2' = 2.0\Omega$，$r_m = 4.67\Omega$，$x_m = 48.7\Omega$，试分别用 T 型等效电路、较准确的近似等效电路和简化等效电路，计算在额定情况下的定子电流和转子电流。

解：（1）T 型等效电路



$$s=\frac{1000-975}{1000}=0.025$$

$$\dot{C}_1=1+\frac{Z_1}{Z_m}=1+\frac{0.42+j2}{4.67+j48.7}$$

$$=1+0.0415-j0.0046=1.0415\angle-0.2554°$$

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}_1}{(Z_1+\frac{Z_mZ_2'}{Z_m+Z_2'})}=\dot{U}_1\frac{1+\frac{Z_2'}{Z_m}}{Z_1+\left(1+\frac{Z_1}{Z_m}\right)Z_2'}=\dot{U}_1\frac{1+\frac{Z_2'}{Z_m}}{Z_1+\dot{C}_1Z_2'}$$

$$=\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°\frac{1+\frac{\frac{0.45}{0.025}+j2}{4.67+j48.7}}{0.42+j2+(1.0415-j0.0046)\left(\frac{0.45}{0.025}+j2\right)}$$

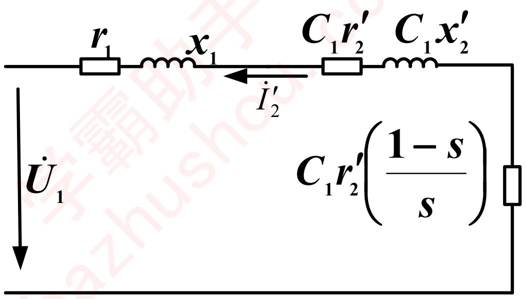
$$=100.3\angle-30.88°A$$

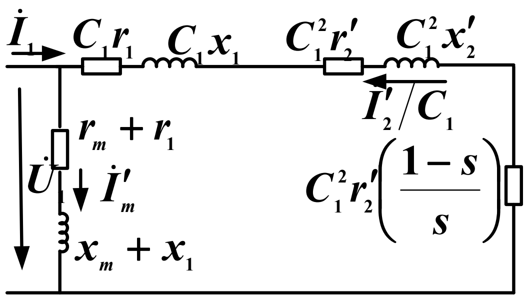
$$-\dot{I}_2'=\dot{I}_1\times\frac{Z_m}{Z_m+Z_2'}=\dot{U}_1\times\frac{1+\frac{Z_2'}{Z_m}}{Z_1+\dot{C}_1Z_2'}\times\frac{Z_m}{Z_m+Z_2'}=\frac{\dot{U}_1}{Z_1+\dot{C}_1Z_2'}$$

$$=\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle0°\frac{1}{0.42+j2+(1.0415-j0.0046)\left(\frac{0.45}{0.025}+j2\right)}$$

$$=88.37\angle-12.27°A$$

（2）较准确的近似等效电路





$$C_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m} = 1.0411，代替\dot{C}_1$$

$$-\dot{I}_2' = \frac{\dot{U}_1}{\left(r_1 + C_1\frac{r_2'}{s}\right) + j\left(x_1 + C_1 x_2'\right)}$$

$$= \frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle 0°}{\left(0.42 + j1.0411 \times \frac{0.45}{0.025}\right) + \left(j2 + 1.0411 \times 2\right)}$$

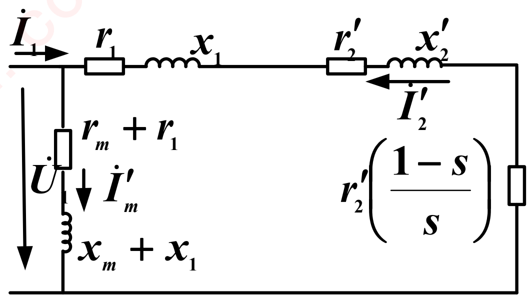
$$= 88.42\angle -12.03° A$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m} + \frac{\dot{U}_1}{C_1 Z_1 + C_1^2 Z_2'}$$

$$= \frac{\frac{3000\angle 0°}{\sqrt{3}}}{(0.42 + j2 + 4.67 + j48.7)} + \frac{\frac{3000\angle 0°}{\sqrt{3}}}{1.0411(0.42 + j2) + 1.0411^2\left(\frac{0.45}{0.025} + j2\right)}$$

$$= \frac{58.88}{\sqrt{3}}\angle -84.27° + \frac{147.06}{\sqrt{3}}\angle -12.03° = 100.63\angle -30.80° A$$

（3）简化等效电路$\left(x_1 << x_m, C_1 = 1\right)$



$$-\dot{I}_2' = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_2'} = \frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle 0°}{0.42 + j2 + \frac{0.45}{0.025} + j2} = 91.88\angle -12.25° A$$

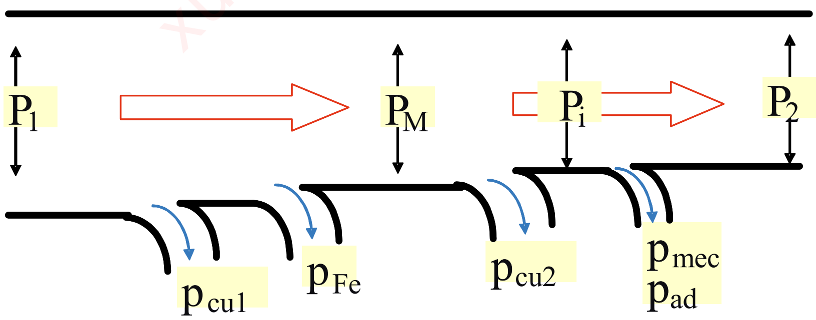
$$\dot{I}_m' = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + r_m + j(x_1 + x_m)_2} = \frac{\frac{3000}{\sqrt{3}}\angle 0°}{(0.42 + j4.67) + (48.7 + j2)}$$

$$= 34.00\angle -84.27° A$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m' + (-\dot{I}_2') = 91.88\angle -12.25° + 34.00\angle -84.27° = 107.4\angle -29.78° A$$

P162：9-6

解：异步电动机的功率流程如图示：



（1）电磁功率：$P_M = P_1 - p_{cu1} - p_{Fe} = 6320W - 341W - 167.5W = 6811.5W$

总机械功率：$P_i = P_M - p_{cu2} = 6811.5W - 237.5W = 5574W$

输出功率：$P_2 = P_i - (p_{mec} + p_{ad}) = 5574W - 45W - 27W = 5502W$

电机效率：$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{5502}{6320} \times 100\% = 87.06\%$

（2）转差率：$s=\frac{p_{cu2}}{P_M}=\frac{237.5}{5811.5}=0.041$

转速：$n=(1-s)n_1=(1-0.041)\times 1500\,r/\min=1438.5\,r/\min$

（3）电磁转矩：$T=\frac{P_M}{\Omega_1}=\frac{5811.5}{2\pi\times\frac{1500}{60}}N\cdot m=37.0N\cdot m$

输出转矩：$T_2=\frac{P_2}{\Omega}=\frac{5502}{2\pi\times\frac{1438.5}{60}}N\cdot m=36.5N\cdot m$

P162：9-7

设有一台$380V$、$50Hz$、$1450r/\min$、$15kW$的三角形联结得三相异步电动机，定子参数与转子参数如折算到同一边时可作为相等，$R_1=R_2'=0.742\Omega$，每相漏抗为每相电阻的 4 倍，可取修正系数$C_1=1+\frac{x_1}{x_m}=1.04$，$R_m=9\Omega$，并且电流增减时漏抗近似为常数。试求：

（1） 在额定运行时的输入功率，电磁功率，内功率以及各项损耗；
（2） 最大电磁转矩，过载能力，以及出现最大转矩时的转差率；
（3） 为了在起动时得到最大转矩，在转子回路中应接入的每相电阻，并用转子电阻的倍数表示之。

解：（1） $n_1=1500r/\min$，$U_1=380V$

$$s=\frac{1500-1450}{1500}=\frac{1}{30}=0.0333$$

$$Z_L'=\frac{R_2'}{s}+jX_{2\sigma}'=\frac{0.742}{0.0333}+j4\times 0.742=22.46\angle 7.59^\circ\Omega$$

$$C_1=1+\frac{x_1}{x_m}=1.04\text{，则 }x_m=25x_1=100r_1=74.2$$

$$Z_m=R_m+jX_m=9+j74.2=74.74\angle 83.08^\circ\Omega$$

所以 $Z=Z_L'//Z_m=20.16\angle 22.73^\circ=18.59+j7.790\Omega$

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{U}_1}{(Z_1+Z)}=\frac{380\angle 0^\circ}{0.742+j4\times0.742+18.59+j7.79}=17.18\angle-29.10^\circ A$$

$$\dot{E}=\dot{U}_1-Z_1\dot{I}_1=380-(0.742+j4\times0.742)\times17.18\angle-29.10^\circ$$
$$=344.1-j38.35=346.2\angle-6.36^\circ V$$

$$\dot{I}_m=\frac{\dot{E}}{Z_m}=\frac{346.2\angle-6.36^\circ}{74.74\angle83.08^\circ}=4.632\angle-89.44^\circ A$$

$$-\dot{I}_2'=\dot{I}_1-\dot{I}_m=17.18\angle-29.10^\circ-4.632\angle-89.44^\circ$$
$$=15.42\angle-13.97^\circ A$$

输入功率 $P_1=3U_1I_1\cos\varphi_1=17113W$

电磁功率 $P_{em}=m_1I_2'^2\frac{R_2'}{s}=3\times15.42^2\times\frac{0.742}{0.0333}kW=15879W$

内功率 $P_i=(1-s)P_{em}=15349W$

定子铜耗 $p_{Cu1}=m_1I_1^2R_1=3\times17.18^2\times0.742kW=657.01W$

转子铜耗 $p_{Cu2}=m_1I_2'^2R_2'=3\times15.42^2\times0.742=529.29W$

铁耗 $p_{Fe}=m_1I_m^2R_m=3\times4.632^2\times9=679.30W$

$$p_{Fe}+p_{ad}=P_i-P_N=15349-15000W=349W$$

（2）最大转矩

$$T_{\max}=\frac{m_1pU_1^2}{4\pi f_1C_1[R_1+\sqrt{R_1^2+(X_{1\sigma}+C_1X_{2\sigma})^2}}$$
$$=\frac{3\times2\times380^2}{4\pi\times50\times1.04\times0.742\times[1+\sqrt{1+16(1+1.04)^2}]}$$
$$=193.8N\cdot m$$

而 $T_N=\frac{P_N}{\frac{2\pi}{60}n_N}=\frac{60\times15\times1000}{2\pi\times1450}N\cdot m=98.79N\cdot m$

所以 $k_m=\frac{T_{\max}}{T_N}=\frac{193.8}{98.79}=1.962$

$$s_k=\frac{C_1R_2'}{\sqrt{R_1^2+(x_1+C_1x_2')^2}}=\frac{C_1R_2'}{\sqrt{R_1^2+(4R_1+C_14R_1)^2}}=0.1265$$

（3）要想起动时得到最大转矩，则应使 $s_k=\dfrac{C_1(R_2'+R_t')}{\sqrt{R_1^2+(4R_1+C_14R_1)^2}}=1$

则

$$R_2'+R_t'=\frac{1}{C_1}\sqrt{R_1^2+(X_{1\sigma}+C_1X_{2\sigma}')^2}=\frac{1}{1.04}\sqrt{R_2'^2+(4R_2'+1.04\times4R_2')^2}$$

解得 $R_t'=6.9R_2'$

每相应串入 $R_t'=6.9R_2'$ 的电阻方使起动时得到最大转矩。

P162：9-9

有一台三相异步电动机，$50Hz$，380V，Δ接法，其空载和短路数据如下：

空载试验 $U_0=U_N=380V$，$I_0=21.2A$ $P_0=1.34kW$

短路试验 $U_k=110V$，$I_k=66.8A$，$P_k=4.14kW$

已知机械损耗为$100W$，$X_1=X_2'$，求该电机的T型等效电路参数。

解 （1）由空载损耗求得铁损耗为

$$p_{Fe}=P_0-mR_1I_0^2-p_{mec}$$
$$=(1.34\times10^3-3\times0.4\times(\frac{21.2}{\sqrt3})^2-100)W=1060W$$

励磁电阻 $R_m=\dfrac{p_{Fe}}{mI_0^2}=\dfrac{1060}{3\times\left(\dfrac{21.2}{\sqrt3}\right)^2}\Omega=2.359\Omega$

$$\left|Z_m + Z_1\right| = \frac{U_0}{I_0} = \frac{380}{\left(\frac{21.2}{\sqrt{3}}\right)}\Omega = 31.05\Omega$$

空载总电抗 $X_0 = X_m + X_1 = \sqrt{31.05^2 - (2.359 + 0.4)^2} = 30.93\Omega$

由短路试验求得

短路阻抗 $$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{110}{\left(\frac{66.8}{\sqrt{3}}\right)}\Omega = 2.852\Omega$$

短路电阻 $$R_k = \frac{P_k}{3I_k^2} = \frac{4140}{3\left(\frac{66.8}{\sqrt{3}}\right)^2}\Omega = 0.9278\Omega$$

短路电抗 $$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{2.85^2 - 0.928^2}\Omega = 2.697\Omega$$

转子电阻 $$R_2' = (R_k - R_1)\frac{X_0}{X_0 - X_k}$$

$$= (0.9278 - 0.4) \times \frac{30.93}{30.93 - 2.697}\Omega = 0.5782\Omega$$

转子漏抗

$$X_2' = X_1 = X_0 - \sqrt{\frac{X_0 - X_k}{X_0}(R_2'^2 + X_0^2)}$$

$$= \left[30.93 - \sqrt{\frac{30.93 - 2.697}{30.93} \times (0.5782^2 + 30.93^2)}\right]\Omega = 1.307\Omega$$

励磁电抗 $$X_m = X_0 - X_1 = (30.93 - 1.307)\Omega = 29.62\Omega$$

（2）空载功率因数：

$$\cos\varphi_0 = \cos(\arctan\frac{X_m + X_1}{R_m + R_1}) = \cos(\arctan\frac{30.93}{2.759}) = 0.08885$$

（3）堵转功率因数：

$$\cos\varphi_k=\frac{R_k}{Z_k}=\frac{0.9278}{2.852}=0.325$$

P163：9-10

有一台三相四极异步电动机，$150kW$，$50Hz$，$380V$，Y接法。额定负载时 $p_{cu2}=2.2kW$，$p_{mec}=2.6kW$，$p_{ad}=1.1kW$，等效电路参数 $r_1=r_2'=0.012\Omega$，$x_1=0.06\Omega$，$x_2'=0.065\Omega$，忽略励磁回路参数。求：

（1）额定运行时转速，转差率；

（2）额定运行时电磁功率和电磁转矩；

（3）电源电压降 20%，最大转矩和临界转差率为多少？若使转矩保持额定不变，电机是否正常运行？若是正常运行，求此时的转速。

解：（1）额定运行时转速，转差率

$$P_{em}=\frac{p_{cu2}}{s}=p_{cu2}+p_{mec}+p_{ad}+P_2$$，则

$$\frac{2.2}{s}=2.2+2.6+1.1+150$$

解得：s=0.014

$$n_1=\frac{60f}{P}=\frac{60\times50}{2}=1500r/mim$$

$$n=n_1(1-s)=1500\times(1-0.014)=1479r/\min$$

（2）额定运行时电磁功率和电磁转矩：

$$P_{em}=p_{cu2}+p_{mec}+p_{ad}+P_2=2.2+2.6+1.1+150=155.9kW$$

$$T_{em}=\frac{P_{em}}{\Omega_1}=\frac{155.9\times10^3}{\frac{1500\times2\pi}{60}}=992.5N\cdot m$$

$$T_L=T_2=\frac{P_2}{\Omega}=\frac{150\times10^3}{\frac{1479\times2\pi}{60}}=968.5N\cdot m$$

（3）电源电压降 20%：

$$T_{\max}=\frac{m_1PU_{1p}^{\ 2}}{2\omega_1(r_1+\sqrt{r_1^2+(x_1+x_2')^2})}$$

$$=\frac{3\times2\times\left(\frac{380\times0.8}{\sqrt{3}}\right)^2}{2\pi\times50\times\left(0.012+\sqrt{0.012^2+(0.06+0.065)^2}\right)}=2138N\cdot m$$

$$s_k=\frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2+(x_1+x_2')^2}}=\frac{0.012}{\sqrt{0.012^2+(0.06+0.065)^2}}=0.0956$$

$\because T_M>T_L$，$\therefore$负载可以正常运行，由于负载转矩不变，此时电磁功率不变。设此时的转差率为

$$T_{\max}\cdot\frac{2}{\frac{s_k}{s'}+\frac{s'}{s_k}}\approx T_{\max}\cdot\frac{2s'}{s_k}=T_{em}\text{，即 }2138\times\frac{2s'}{0.0956}=992.5$$

$$s'=0.022$$

$$n=1467r/\min$$

P163：9-11

一台三相异步电动机，额定电压为$28kW$，$50Hz$，$380V$，Y联接，额定转速为$960r/\min$，$\cos\theta_N=0.88$，$p_{cu1}+p_{Fe}=2.4kW$，$p_{mec}=0.9kW$，过载能力$k_M=2.2$。试求：

（1）额定负载时转子铜损耗，电磁功率和电磁转矩；

（2）额定负载时输入功率，效率和定子电流；

（3）转速为$950r/\min$和$970r/\min$时，电磁转矩、电磁功率和输入功率各为多少？设此时定子铜耗和铁耗仍为2.4kW

解：$n_1=\dfrac{60f_1}{p}=1000r/\min;s_N=\dfrac{n_1-n_N}{n_1}=0.04$

（1）额定负载时转子铜损耗，电磁功率和电磁转矩

$$P_{em}=p_{cu2}+p_{mec}+p_{ad}+P_2=s\cdot P_M+p_{mec}+p_{ad}+P_2$$

忽略 p_{ad}： $P_{em} = s \cdot P_{em} + 0.9 + 28$

解得 $P_{em} = 30.1kW$

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{30.1\times10^3}{\frac{1500\times2\pi}{60}} = 287.5N\cdot m$$

（2） $P_1 = P_{em} + p_{cu1} + p_{Fe} = 30.1 + 2.4 = 32.5kW$

$$\eta_N = \frac{P_2}{P_1}\times100\% = \frac{28}{32.5} = 86.15\%$$

$$p_{cu2} = s_N P_{em} = 1.53kW$$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_{1N}\cos\theta_N} = \frac{32500}{\sqrt{3}\times0.88\times380} = 56.11A$$

（3）转速 $n_2 = 950r/\min$ 时, $s_2 = 0.05$，

$n_3 = 970r/\min$ 时, $s_3 = 0.03$

由 $K_m = \dfrac{\frac{s_N}{s_k}+\frac{s_k}{s_N}}{2}$ 得： $s_k^2 - 2k_m s_N s_k + s_N^2 = 0$

代入数据得： $s_k^2 - 2\times2.2\times0.04\times s_k + 0.04^2 = 0$

$s_k = 0.009616$(舍去), $s_k = 0.1664$ 或 $s_k = s_N\left(K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}\right)$

$$T_N = \frac{P_2}{\Omega_N} = \frac{28\times10^3}{\frac{960\times2\pi}{60}} = 278.52N\cdot m$$

$$T_{em2} = \frac{2}{\frac{s_2}{s_k}+\frac{s_k}{s_2}}\cdot k_m\cdot T_N = 337.7N\cdot m$$

$$T_{em3}=\frac{2}{\frac{s_3}{s_k}+\frac{s_k}{s_3}}\cdot k_m\cdot T_N=214.1N\cdot m$$

$$P_{em2}=T_{em2}\cdot\Omega_1=337.7\times\frac{2\pi\times1000}{60}=35365W\doteq35.36kW$$

$$P_{em3}=T_{em3}\cdot\Omega_1=214.1\times\frac{2\pi\times1000}{60}=22421W\doteq22.42kW$$

$$P_{12}=P_{em2}+p_{cu1}+p_{Fe}=35.36+2.4=37.76kW$$

$$P_{13}=P_{em3}+p_{cu1}+p_{Fe}=22.42+2.4=24.82kW$$

第十章　三相异步电机的起动和调速

P185：10-2

有一台三相笼型异步电动机，额定参数：380V、50Hz、1455r/min、三角形连接，每相参数：$r_1=r'_2=0.072\Omega$、$x_1=x'_2=0.2\Omega$、$r_m=0.7\Omega$、$x_m=5\Omega$，试求：

（1）在额定电压下直接起动时，起动电流倍数、起动转矩倍数和功率因数？

（2）应用星形-三角形起动时，起动电流倍数、起动转矩倍数和功率因数？

解：（1）$s_N=\dfrac{n_1-n_N}{n_1}=\dfrac{1500-1455}{1500}=0.03$，设$\dot{U}_1=380\angle 0^\circ$，根据 T 型等效电路

可得：

$$Z_1=r_1+jx_1=0.213\angle 70.2^\circ \qquad Z_m=r_m+jx_m=5.05\angle 82^\circ$$

$$Z'_{2s}=r'_2/s_N+jx'_2=2.4+j0.2=2.41\angle 5.2^\circ \qquad c_1=1+\frac{x_1}{x_m}=1+\frac{0.2}{5}=1.04$$

$$\dot{I}_N=\frac{\dot{U}_1}{Z_1+Z_m//Z'_{2s}}=\frac{380\angle 0^\circ}{0.213\angle 70.2^\circ+2.01\angle 27.7^\circ}=175\angle -31.6^\circ$$

$$T_N=\frac{m_1p}{\omega_1}U_1^2\frac{r'_2/s_N}{(r_1+c_1r'_2/s_N)^2+(x_1+c_1x'_2)^2}$$
$$=\frac{3\times 2}{6.28\times 50}\times\frac{3\times 2\times 380^2\times 0.072/0.03}{(0.072+1.04\times 0.072/0.03)^2+(0.2+1.04\times 0.2)^2}$$
$$=979.5(Nm)$$

$$\dot{I}_{st}=\frac{\dot{U}_1}{(r_1+r'_2)+j(x_1+x'_2)}=\frac{380\angle 0^\circ}{(0.072+0.072)+j(0.2+0.2)}=894\angle -70.2^\circ(A)$$

$$\cos\theta_{1st}=\cos(-70.2^\circ)=0.34$$

$$T_{st}=\frac{m_1p}{\omega_1}U_1^2\frac{r'_2}{(r_1+r'_2)^2+(x_1+x'_2)^2}=2.89(Nm)$$

∴直接起动时：$K_I=\dfrac{I_{st}}{I_N}=\dfrac{894}{175}=5.1(\text{倍})$　　$K_{st}=\dfrac{T_{st}}{T_N}=\dfrac{2.89}{979.5}=0.003(\text{倍})$

（2）采用星形起动时：

$$\dot{I}_{st}=\frac{\dot{U}_1}{(r_1+r_2^{'})+j(x_1+x_2^{'})}=\frac{(380/\sqrt{3})\angle 0^{\circ}}{(0.072+0.072)+j(0.2+0.2)}=516\angle-70.2^{\circ}(A)$$

$$\cos\theta_{1st}=\cos(-70.2^{\circ})=0.34$$

∴ 星 形 - 三 角 形 起 动 时 ： $K^{'}_I=\frac{K_I}{3}=\frac{5.1}{3}=1.7(倍)$

$$K^{'}_{st}=\frac{K_{st}}{3}=\frac{0.003}{3}=0.001(倍)$$

P185：10-3

题 10-2 中的异步电动机如是绕线型转子，如果使起动转矩有最大值，求每相转子回路中应接入多大的电阻，这时起动电流为多少？如果限制起动电流不超过额定电流的 2 倍，求每相转子回路中应接入多大的电阻，这时起动转矩为多少？

解：起动时：n=0，s_k=1，则 $T_{st}=T_{max}$，即

$$s_k=\frac{c_1(r_2^{'}+r_{\Delta}^{'})}{\sqrt{r_1^2+(x_1+c_1x_2^{'})^2}}=\frac{1.04\times(0.072+r_{\Delta}^{'})}{\sqrt{0.072^2+(0.2+1.04\times0.2)^2}}=1$$

解得：$r_{\Delta}^{'}=0.326(\Omega)$

$$I_{st}=\frac{U_1}{\sqrt{(r_1+r_2^{'}+r_{\Delta}^{'})^2+(x_1+x_2^{'})^2}}=\frac{380}{\sqrt{(0.072+0.072+0.326)^2+(0.2+0.2)^2}}=615.7(A)$$

若限制 $I_{st}\leqslant 2I_N$，则有：

$$I_{st}=\frac{U_1}{\sqrt{(r_1+r_2^{'}+r_{\Delta}^{''})^2+(x_1+x_2^{'})^2}}=\frac{380}{\sqrt{(0.072+0.072+r_{\Delta}^{''})^2+(0.2+0.2)^2}}\leq 2\times175$$

解得：$r_{\Delta}^{''}=0.85(\Omega)$

$$T_{st}=\frac{m_1p}{\omega_1}U_1^2\frac{r_2^{'}}{(r_1+r_2^{'}+r_{\Delta}^{''})^2+(x_1+x_2^{'})^2}=2206(Nm)$$

P185：10-4

有一台三相异步电动机，UN=380V，三角形连接，起动电流倍数为 6.5，起动转矩倍数为 2，试求：

（1）应用星形-三角形起动，起动电流和起动转矩各为多少？

（2）应用自耦变压器起动，使起动转矩大于额定转矩的 0.6 倍，起动电流小于额定电流的 3 倍，此自耦变压器的低压抽头有 80%、60%和 40%三组，应该选哪一组抽头？

解：（1）星形-三角形起动时：

$$K'_I = \frac{K_I}{3} = \frac{6.5}{3} = 2.17(倍) \qquad K'_{st} = \frac{K_{st}}{3} = \frac{2}{3} = 0.67(倍)$$

（2）由已知可得：

$$K''_I = \frac{K_I}{k_a^2} = \frac{6.5}{k_a^2} \le 3$$ 解得：$k_a \leqslant 1.83$

$$K''_{st} = \frac{K_{st}}{k_a^2} = \frac{2}{k_a^2} \ge 0.6$$ 解得：$k_a \geqslant 1.47$

即 147≤ k_a ≤1.83

当变压器抽头为 80%时，$k_a = \dfrac{U_N}{0.8U_N} = 1.25$

当变压器抽头为 60%时，$k_a = \dfrac{U_N}{0.6U_N} = 1.54$

当变压器抽头为 40%时，$k_a = \dfrac{U_N}{0.4U_N} = 2.5$

∴ 应选择 60%的抽头

P186：10-6

解：（1）额定转速差为 $S_N = \dfrac{n_1 - n_N}{n_1} = \dfrac{1500-1470}{1500} = 0.02$

速度降至$1300r/\min$时的转速差为$S^{'}=\frac{n_1-n_2}{n_1}=\frac{1500-1300}{1500}=0.1333$

则每相串入调速电阻的阻值为$r_{\Delta}=(\frac{s^{'}}{s}-1)r_2^{'}=5.667r_2^{'}$

$P_{cu2}=\frac{s_N}{1-s_N}P_N=0.612kW$

$r_2^{'}=\frac{P_{cu2}}{3I^2}=0.07695\Omega$

则$r_{\Delta}=0.4361\Omega$

（2）调速电阻上功率损耗为$P_{\Delta}=3I^2r_{\Delta}=3.745kW$

P186：10-7

解：额定转差率$S_N=\frac{n_1-n_N}{n_1}=\frac{1000-980}{1000}=0.02$

（1）当转子中所串的调速电阻为0.73Ω时$\frac{s^{'}}{s_N}=\frac{r_2^{'}}{r_2}+1=11$

解得$s^{'}=0.22$

此时电机的转速为$n=\frac{1-s^{'}}{1}\times1000=780r/\min$

（2）当转子中所串的调速电阻为1.7Ω时

$\frac{s^{''}}{s_N}=\frac{r_2^{''}}{r_2}+1=24.29$

解得$s^{''}=0.4858$

此时电机的转速为$n=\frac{1-s^{''}}{1}\times1000=514.2r/\min$

第十二章　同步电机的基本理论和运行特性

12-1.

解：

$$U_{\phi}=\frac{U_N}{\sqrt{3}}=6062.17V$$

$$I_{\phi}=\frac{P_N}{3COS\theta_N\cdot U_{\phi}}=1718.31A$$

设$\dot{U}=U_{\phi}\angle 0^{\circ}$，则$\dot{I}=I_{\phi}\angle -36.8^{\circ}$,则电压方程为：

$$\begin{aligned}\dot{E}_0&=\dot{U}+\dot{I}\,jx_s\\&=6062.17\angle 0^{\circ}+1718.31\angle -36.8^{\circ}(j2.13\times\frac{6062.17}{1718.31})\\&=13792.28+j10333.01\\&=17233.63\angle 36.84^{\circ}V\\&\therefore E_0=17233.63V\end{aligned}$$

$\psi=36.84^{\circ}+36.8^{\circ}=73.64^{\circ}$,即$\dot{I}$滞后$\dot{E}_0$ 73.64°.

12-2.

解：

（1）$Z_N=\frac{U_N}{\sqrt{3}I_N}=3.52\Omega$

$$\therefore x_{s*}=\frac{x_s}{Z_N}=\frac{2.3}{3.52}=0.65$$

（2）设$\dot{U}_*=1\angle 0^{\circ}$，则$\dot{I}_*=1\angle -36.8^{\circ}$

$$\begin{aligned}\dot{E}_{0*}&=\dot{U}_*+j\dot{I}_*x_{s*}\\&=1\angle 0^{\circ}+j1\angle -36.8^{\circ}\times 0.65\\&=1.39+j0.52\\&=1.484\angle 20.51^{\circ}\end{aligned}$$

$$\therefore E_{0*}=1.484$$

（3）同理设$\dot{U}_* = 1\angle 0^\circ$，则$\dot{I}_* = 1\angle 36.8^\circ$

$$
\begin{aligned}
\dot{E}_{0*} &= \dot{U}_* + j\dot{I}_* x_{s*} \\
&= 1\angle 0^\circ + j1\angle 36.8^\circ \times 0.65 \\
&= 0.61 + j0.52 \\
&= 0.802\angle 40.45^\circ
\end{aligned}
$$

$\therefore E_{0*} = 0.802$

12-3.

解：

$$
\dot{E}_{0*} - j\dot{I}_{d*}(x_{d*} - x_{q*}) = 1\angle 0^\circ + j1\angle -36.8^\circ \cdot 0.554 = 1.404\angle 18.40^\circ
$$

$\therefore \delta = 18.4^\circ$

$\therefore \varphi = -\theta + \delta = 36.8^\circ + 18.4^\circ = 55.2^\circ$

$\therefore I_{d*} = I \cdot \sin\varphi = 1 \times \sin 55.2^\circ = 0.82$

$$
\begin{aligned}
\dot{E}_{0*} &= \dot{U}_* + j\dot{I}_* x_q + j\dot{I}_{d*}(x_{d*} - x_{q*}) \\
&= 1.404\angle 18.40^\circ + j0.82\angle 18.40^\circ(1 - 0.554) \\
&= 1.7697\angle 18.4^\circ
\end{aligned}
$$

又 $U_\phi = \dfrac{10500}{\sqrt{3}} = 6062.18 = 10728.24V$

$\therefore E_0 = 1.7697 \times 6062.18 = 10728.24V$

$\varphi = 55.2^\circ$

12-4.

解：

（1）$\dot{U}_* + j\dot{I}_* x_q = 1\angle 0^\circ + j1\angle -36.8^\circ \cdot 0.6$

$= 1452\angle 18.84^\circ$

$\therefore$ 功角$\theta = 18.84^\circ$

$E_{0*} = U_* \cos\theta + I_{d*} x_{d*}$

$= \cos 18.84^\circ + 0.9 \cdot \sin(18.84^\circ + 36.8^\circ)$

$= 1.689$

（2）$I_{d*} = I_* \cdot \sin(18.84^\circ + 36.8^\circ) = 0.826$

$I_{q*} = I_* \cdot \cos(18.84^\circ + 36.8^\circ) = 0.564$

12-5

解：

（1）$p = \dfrac{60f}{n} = \dfrac{60 \times 50}{1000} = 3$ m=3

$\tau = \dfrac{\pi d}{2p} = \dfrac{\pi \times 0.86}{2 \times 3} = 0.45$米

用槽表示：$\tau = \dfrac{z}{2p} = \dfrac{72}{2 \times 3} = 12$ y=10

$\alpha = \dfrac{p \cdot 360^\circ}{z} 15^\circ$ $\beta = (\tau - y)\alpha = 30^\circ$

$q = \dfrac{z}{2mp} = \dfrac{72}{2 \times 3 \times 3} = 4$

$$K_{N1} = \frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}} \cos\frac{\beta}{2} = 0.925$$

$$K_{N3} = \frac{\sin\frac{3q\alpha}{2}}{q\sin\frac{3\alpha}{2}} \cos\frac{3\beta}{2} = 0.462$$

$$\Phi_{m1} = \frac{2}{\pi} B_{m1} l_a \tau = 0.088wb$$

$$\Phi_{m3}=\frac{2}{\pi}B_{m3}l_a\frac{\tau}{3}=0.0055wb$$

$$N=\frac{2pqN_c}{a}=\frac{2\times3\times4\times5}{2}=60$$

$$\therefore E_{1\phi}=4.44fK_{N1}N\Phi_{m1}=4.44\times50\times0.925\times60\times0.088=1084.248V$$

$$E_{3\phi}=4.44\times3fK_{N3}N\Phi_{m3}=4.44\times150\times0.462\times60\times0.0055=101.54V$$

则每相电动势 $:E_{\phi}=\sqrt{E_{1\phi}^2+E_{3\phi}^2}=1089V$

则每相线电动势: $E_l=\sqrt{3}E_{\phi}=1886.2V$

（2） $F_{m1}=\frac{3}{2}\times0.9\cdot\frac{NK_{N1}}{p}I=1.5\times0.9\times\frac{60\times0.925}{3}\times100=2497.5A$

$$F_{m3}=0$$

$$\therefore F=\sqrt{F_{m1}^2+F_{m3}^2}=2497.5A$$

12-7.

解:

（1）

$$I_N=\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N}=\frac{8750}{\sqrt{3}\times11}=459.26A$$

$\because$ 是星型连接

$\therefore$ 额定相电压 $U_{N\Phi}=\frac{U_N}{\sqrt{3}}=6350.85V$

额定相电流 $I_{N\Phi}=I_N=459.26A$

$$Z_b=\frac{U_{N\Phi}}{I_{N\Phi}}=13.82\Omega$$

将题目所给的数据表格化成标幺值形式:

I_{f0*}	2.16	1.64	1.35	1.14	1	0.88

E_{0*}	1.36	1.27	1.18	1.09	1	0.91

I_*	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
I_{f*}	0.16	0.35	0.54	0.72	0.91

I_{f*}	2.30	2.11	1.95	1.81	1.70	1.64
U_*	1.09	1.04	0.99	0.95	0.89	0.85

（2）由（1）中表格所得的向量图有：

不饱和 $x_{d*} = \dfrac{E_{0*}'}{I_{k*}} = \dfrac{1.05}{1.4} = 0.75$　　故 $x_d = x_{d*} \cdot \dfrac{6350.85}{459.26} = 10.37\Omega$

饱和 $x_{d*}' = \dfrac{x_d'}{\dfrac{U_N}{I_N}} = \dfrac{I_N x_d'}{U_N} = \dfrac{\overline{ca}}{\overline{ab}} = 0.31$　　故 $x_d' = x_{d*}' \cdot \dfrac{6350.85}{459.26} = 4.3\Omega$

（3）$x_{\sigma *} = \dfrac{\overline{a'b'}}{4} = \dfrac{0.88}{4} = 0.22$

$\therefore x_\sigma = x_{\sigma *} \cdot \dfrac{6350.85}{459.26} = 3.04\Omega$

（4）$k_K = \dfrac{I_{f0*}}{I_{fk*}} = \dfrac{1}{0.72} = 1.39$

12-8.

(参考<<电机学试题分析与习题>>230 页 15-53 题步骤计算)

解：$\theta_N = -\arccos 0.8 = -36.87^\circ$

$\dot{E}_{\delta *} = \dot{U}_{N*} + \dot{I}_{N*} \cdot x_{\sigma *} = 1 + j1\angle -36.87^\circ \times 0.22 = 1.183\angle 6.45^\circ$

$E_\delta = 1.183 \times 11000 = 13013V$，由此查空载特性得：

$$I_{f\delta}=\frac{(13013-13000)\times(346-284)}{14000-13000}+284=284.81A$$

$6.45^{\circ}-\theta_N=43.32^{\circ}$

$I_N\cdot x_\sigma=459.26\times3.04=1396.15V$

由空载特性曲线直线部分得：$I_{f\sigma}=26A$

由短路特性知道：$I_k=I_N=459.26A$ 时，$I_f=152A$

$\therefore I_{fad}=I_f-I_{f\sigma}=152-26=126A$

$\dot{I}_{fN}=\dot{I}_{fad}+\dot{I}_{f\delta}=126\angle90^{\circ}-43.32^{\circ}+284.81=382.41\angle13.87^{\circ}A$

由 $I_{fN}=382.41A$ 查空载特性得：$E_0=14331V$

$$\Delta U\%=\frac{E_0-U_N}{U_N}\times100\%=\frac{14331-11000}{11000}\times100\%=30.28\%$$

第十三章　同步发电机在大电网上运行

13-1

解：

（1）$E_{0*}=\sqrt{U_*^2+(I_*\cdot x_{s*})^2}=\sqrt{2}=1.414$

$$\Delta U\%=\frac{E_{0*}-U_*}{U_*}\times100\%=41.4\%$$

$$\delta=\arctan\frac{I_*\cdot x_{s*}}{U_*}=45^{\circ}$$

（2）$\dot{I}_*=0.9$

$\theta=31.79^{\circ}$

$$\dot{E}_{0*}=\dot{U}_*+j\dot{I}_*\cdot x_{s*}$$
$$=1+j0.9\angle-31.79^\circ$$
$$=1.474+j0.765$$
$$=1.66\angle 27.43^\circ$$

$\therefore E_{0*}=1.66 \qquad \delta=27.43^\circ$

$$\Delta U\%=\frac{1.66-1}{1}\times 100\%=66\%$$

（3）$\dot{I}_*=0.9$

$\theta=31.79^\circ$

$$\dot{E}_{0*}=\dot{U}_*+j\dot{I}_*\cdot x_{s*}$$
$$=1+j0.9\angle 31.79^\circ$$
$$=0.526+j0.765$$
$$=0.928\angle 55.49^\circ$$

$\therefore E_{0*}=0.928 \qquad \delta=55.49^\circ$

$$\Delta U\%=\frac{0.928-1}{1}\times 100\%=-7.2\%$$

13-2

解：

（1）设$\dot{U}_{N*}=1\angle 0^\circ$　则$\dot{I}_*=1\angle 0^\circ$

$$\dot{U}_{N*}+j\dot{I}_*\cdot x_{q*}=1.0+j0.6$$

$$\delta=\arctan\frac{0.6}{1}=30.96^\circ$$

$$\varphi=\theta+\delta=0^\circ+30.96^\circ=30.96^\circ$$

$$I_{d*}=I\cdot\sin\varphi=0.514$$

$$I_{q*}=I\cdot\cos\varphi=0.857$$

$$E_{0*}=\dot{U}_{*}\cdot\cos\delta_{N}+I_{d*}\cdot x_{d*}$$
$$=1\times\cos 30.96^{\circ}+0.514$$
$$=1.372$$

$$\Delta U\%=\frac{1.372-1}{1}\times 100\%=37.2\%$$

$$P_{M*}=\frac{E_{0*}\cdot U_{*}}{x_{d*}}\cdot\sin\delta+\frac{U_{*}^{2}(x_{d*}-x_{q*})}{2x_{d*}\cdot x_{q*}}\sin 2\delta$$
$$=1.372\sin\delta+0.333\sin 2\delta$$

（2）设$\dot{U}_{N*}=1\angle 0^{\circ}$　则$\left|\dot{I}_{*}\right|=0.9$

$$\dot{I}_{*}=0.765-j0.474=0.9\angle 31.79^{\circ}$$

$$\dot{U}_{N*}+j\dot{I}_{*}\cdot x_{q*}=1.284+j0.459$$

$$\delta=\arctan\frac{0.459}{1.284}=19.67^{\circ}$$

$$\varphi=\theta+\delta=31.79^{\circ}+19.67^{\circ}=51.46^{\circ}$$

$$I_{d*}=I\cdot\sin\varphi=0.704$$

$$I_{q*}=I\cdot\cos\varphi=0.561$$

$$E_{0*}=\dot{U}_{*}\cdot\cos\delta_{N}+I_{d*}\cdot x_{d*}$$
$$=1\times\cos 19.67^{\circ}+0.704$$
$$=1.646$$

$$\Delta U\%=\frac{1.646-1}{1}\times 100\%=64.6\%$$

$$P_{M*}=\frac{E_{0*}\cdot U_{*}}{x_{d*}}\cdot\sin\delta+\frac{U_{*}^{2}(x_{d*}-x_{q*})}{2x_{d*}\cdot x_{q*}}\sin 2\delta$$
$$=1.646\sin\delta+0.333\sin 2\delta$$

（3）设$\dot{U}_{N*}=1\angle 0^\circ$　则$\left|\dot{I}_*\right|=0.9$

$$\dot{I}_*=0.765+j0.474=0.9\angle -31.79^\circ$$

$$\dot{U}_{N*}+j\dot{I}_*\cdot x_{q*}=0.716+j0.459$$

$$\delta=\arctan\frac{0.459}{0.716}=32.66^\circ$$

$$\varphi=\theta+\delta=32.66^\circ-31.79^\circ=0.87^\circ$$

$$I_{d*}=I\cdot\sin\varphi=0.014$$

$$\begin{aligned}E_{0*}&=\dot{U}_*\cdot\cos\delta_N+I_{d*}\cdot x_{d*}\\&=1\times\cos 32.66^\circ+0.014\\&=0.856\end{aligned}$$

$$\Delta U\%=\frac{0.856-1}{1}\times 100\%=-14.4\%$$

$$\begin{aligned}P_{M*}&=\frac{E_{0*}\cdot U_*}{x_{d*}}\cdot\sin\delta+\frac{U_*^2(x_{d*}-x_{q*})}{2x_{d*}\cdot x_{q*}}\sin 2\delta\\&=0.856\sin\delta+0.333\sin 2\delta\end{aligned}$$

13-3

解：

（1）$U_\phi=\frac{U_N}{\sqrt{3}}=\frac{105000}{\sqrt{3}}=6.06KV$

$$I_\phi=I_l=\frac{P}{\sqrt{3}U_N}=\frac{24000}{\sqrt{3}\times 10.5}=1.32KA$$

故 $Z_b=\dfrac{U_\delta}{I_\delta}=\dfrac{6.06}{1.32}=4.6\Omega$

所以 $x_{d*}=\dfrac{x_d}{Z_b}=\dfrac{5}{4.6}=1.09 \qquad x_{q*}=\dfrac{x_q}{Z_b}=\dfrac{2.76}{4.6}=0.6$

$$P_*=\frac{E_{0*}\cdot U_*}{x_{d*}}\cdot\sin\delta+\frac{U_*^2(x_{d*}-x_{q*})}{2x_{d*}\cdot x_{q*}}\sin 2\delta$$
$$=1.376\sin\delta+0.375\sin 2\delta$$

（2） $P_*=\dfrac{20MKVA}{24MKVA}=0.833$

解方程 $1.376\sin\delta+0.375\sin 2\delta=0.833$

得 $\delta=23.8^\circ$

（3） $I_{d*}=\dfrac{E_{0*}-U_*\cdot\cos\delta}{x_{d*}}=\dfrac{1.5-1\cdot\cos 23.8^\circ}{1.09}=0.537$

$I_{q*}=\dfrac{U_*\cdot\sin\delta}{x_{q*}}=\dfrac{1\cdot\sin 23.8^\circ}{0.6}=0.673$

$I_*=\sqrt{I_{d*}^2+I_{q*}^2}=0.86$

$\varphi=\arctan\dfrac{I_{d*}}{I_{q*}}=38.57^\circ$

$\theta=\varphi-\delta=14.77^\circ$

所以 $Q=S\cdot U_*I_*\sin\theta=24MVA\cdot 1\times 0.86\sin 14.77^\circ=5.256MVA$

（4） $\dfrac{dP_*}{d\delta}=1.376\cos\delta+0.75\cos 2\delta=0$

因为 $1<\cos\delta<1$，解这个方程得 $\cos\delta=0.3842$

即 $\delta=67.4^\circ$

所以 $\sin\delta=0.923 \qquad \sin 2\delta=0.71$

故 $P_{\max *}=1.376\times 0.923+0.375\times 0.71=1.54$

$P_{\max}=1.54\times 24MW=36.96MW$

13-4

解：

（1）$\dot{E}_{0*}=\dot{U}_{*}+jI_{*}\cdot x_{s*}$ ，$\dot{U}_{*}=jI_{*}\cdot x_{s*}+\dot{E}_{0*}^{/}$

所以 $\dot{E}_{0*}^{/}=2\dot{U}_{*}-\dot{E}_{0*}$

令 $\dot{U}_{*}=1\angle 0^{\circ}$，$P_{*}=0.5$

则 $P_{*}=\dfrac{E_{0*}\cdot U_{*}}{x_{s*}}\sin\delta=0.5\Rightarrow\delta=24.62^{\circ}$

所以 $\dot{E}_{0*}=\dot{U}_{*}+jI_{*}\cdot x_{s*}=1.2\angle 24.62^{\circ}$

$\dot{E}_{0*}^{/}=2\dot{U}_{*}-\dot{E}_{0*}=2-1.2\angle 24.62^{\circ}=1.038\angle -28.81^{\circ}$

（2）$P_{*}=\dfrac{E_{0*}\cdot U_{*}}{x_{s*}}\sin\delta=0.5$

$E_{0*}=1.1$ 时 $\dot{E}_{0*}^{/}=1.038$ 不变

$\varphi=\arcsin(\dfrac{1}{1.1\times 1.04})=61.24^{\circ}$

$2I_{*}\cdot x_{s*}=\sqrt{E_{0*}^{2}+E_{0*}^{/2}-2E_{0*}E_{0*}^{/}\cos 61.24^{\circ}}=1.09$

$U_{0*}=0.5\sqrt{2\left[E_{0*}^{2}+\dot{E}_{0*}^{/2}-(2I_{*}\cdot x_{s*})^{2})\right]}=0.92$

13-6

解：

设$\dot{U}_* = 1\angle 0^\circ$　$\dot{I}_{D*} = 0.8 + j0.6$

$\dot{I}_* = -0.8 - j0.6$

$U_* + jI_* x_{q*} = 1.36 - j0.48 = 1.44\angle -19.44^\circ$

故$\delta = -19.4^\circ$

$\theta = \arccos 0.8 = 36.9^\circ$

所以$I_{d*} = I_* \sin(\theta - \delta) = 0.832$

$E_{0*} = U_* \cos\delta + I_{d*} \cdot x_{d*} = 1 \cdot \cos(-19.4^\circ) + 0.832 \times 1 = 1.77$
所以该电动机在过励状态下运行。

第十六章　直流电机的基本原理和电磁关系

16-3.解：

（1）单叠绕组 a=p=2

总导体数 N=2 N_0Z=756

$$C_e = \frac{pN}{60a} = 12.6$$

感应电动势 $E_a = C_e \Phi n = 220.5V$

(2)　$$C_T = \frac{pN}{2\pi a} = 120.3$$

$$T = C_T \Phi I_a = 31.6$$

16-7 .解：

(1) 单波绕组 a=1

$$C_e = \frac{pN}{60a} = 8.87$$

每次磁通 $\Phi=\frac{Ea}{C_e n}=o.o173wb$

（2）单叠绕组 a=p=2

$C_e=\frac{pN}{60a}=4.43$

感应电动势 $E_a'=C_e\Phi n=115V$

（3）$E_a''=C_e\Phi n=184.1$

（4）单波绕组 k $C_T=\frac{pN}{2\pi a}=84.67$

（5）$P_M=T\Omega=\frac{2\pi pN}{60}=2301.2$

$I_a'=\frac{P_M}{E_a'}=20A\quad T'=C_T\Phi I_a'=29.3N.m$

16—8. 解：

（1） 单波绕组 a=1

$A=\frac{NI_a}{\pi D_a 2a}=187.5\,A/cm$

（2）$F_a=\frac{NI_a}{8pa}=1016\,A/极$

（3）电刷顺时针转过10°电角度，$\beta=10^\circ$

电枢磁动势直轴最大值 $F_{ad}=F_a\frac{2\beta}{\pi}=113A$

交轴最大值 $F_{aq}=F_a\frac{\pi-2\beta}{\pi}=903A$

16—9. 解：

（1）单波绕组 a=1

$A=\frac{NI_a}{\pi 2D_a 2a}=204\,A/cm$

（2）$F_a = \dfrac{NI_a}{8pa} = 1136.4A$

（3）$F_{cqd} = 12\% F_a = 136.4A$

（4）$E_{aN} = U_N + I_{an} r_a = 100V$

对应的有效励磁电流 $I_{fo} = 1.36A$

额定情况下 $I_{fN} = 1.53A$

$\Delta I_f = 0.17A \quad N_f = \dfrac{F_{aqd}}{\Delta I_f} = 803$匝

16—10.解：

（1） 电机额定电流 $I_N = \dfrac{P_N}{U_N} = 78.26A$

（2） 励磁电流 $I_f = \dfrac{U_N}{r_f} = 3.48A$

电枢电流 $I_a = I_N + I_f = 81.74A$

励磁损耗 $P_f = U_N I_f = 400.76W$

电枢铜损 $P_a = I_a^2 r_a = 467.7W$

电刷损耗 $P_b = 2\Delta U I_a = 163.48W$

机械功率 $P_M + P_N + P_f + P_a + P_b = 10031.94W$

输入功率 $P_1 = P_M + P_{Fe} + P_{mec} = 10541.94W$

效率 $\eta = \dfrac{P_N}{P_1} = 85.37\%$

（2）$P_M = 10031.94W \qquad T = \dfrac{P_M}{\Omega} = 66.07Nm$

第十七章　直流发电机和直流电动机

17—4. 解：

额定电流 $I_N = \dfrac{P_N}{U_N} = 400A$

并励发电机的电枢反应去磁作用 $F_{aqd} = I_f N_f - N_f I_{f0} = 1991.7A$

采用极复励，用串励绕组的磁化作用补偿电枢反应的去磁作用

$I_M N_s = F_{aqd}$　　$N_s = \dfrac{F_{aqd}}{I_N} = 5$匝

17—5. 解：

（1）额定时 $E = U_N - I_N r_a - 2\Delta U = 208.5V$　　$n_N = \dfrac{E}{C_e\phi}$

空载时 $n_0 = \dfrac{U_N}{C_e\phi}$　　$n_0 = \dfrac{U_N n_N}{E} = 1213.4\, r/\min$

$\Delta n = (n_0 - n_N)/n_N = 5.5\%$

（2）$n_N = \dfrac{E}{C_e 85\%\Phi_0}$　　$n_0 = \dfrac{U_N}{C_e\Phi_0}$

$n_0 = 1031.4$　　$\Delta n = -10.3\%$

17—6. 解：

（1）满载时输入功率：$P_1 = \dfrac{P_N}{\eta} = \dfrac{3.5}{0.8} = 4.375KW$

电枢电流：$I_a = \dfrac{P_1}{U_N} = \dfrac{4375}{220} = 19.89A$

反电动势：$E_a = U_N - I_a r_a - 2\Delta U = 220 - 19.89\times 0.8 - 2 = 202.1V$

串励电动机：$I = I_a = I_s = 19.89A$

考虑电枢反应去磁作用后：$I_{f0} = I_s - \Delta I_f = 19.89 - 1 = 18.89A$

利用插值法得：$C_e\Phi = 0.20 + (0.22 - 0.20)\times\dfrac{18.89 - 15.7}{22.0 - 15.7} = 0.2101$

故满载时转速：$n = \dfrac{E_a}{C_e\Phi} = \dfrac{202.1}{0.2101} = 962r/\min$

（2）半载时电枢电流：$I_a = 19.89\times 0.5 = 9.945A$

反电动势：$E_a = U_N - I_a r_a - 2\Delta U = 220 - 9.945\times 0.8 - 2 = 210V$

$I = I_a = I_s = 9.945A$

$\Delta I_f = 0.5A$

$I_{f0} = I_s - \Delta I_f = 9.945 - 0.5 = 9.445A$

$C_e\Phi = 0.16 + (0.18 - 0.16)\times\dfrac{9.445 - 8.8}{11.3 - 8.8} = 0.1652$

半载时转速：$n = \dfrac{E_a}{C_e\Phi} = \dfrac{210}{0.1652} = 1271r/\min$

（3）当转速卫 2000r/min 时，电枢电流很小，可以略去电枢绕组得电压降

此时感应电动势：$E_a = U_N = 220V$

$C_e\Phi = \dfrac{220}{2000} = 0.11$

故 $I = 3.6 + (5.7 - 3.6)\times\dfrac{0.11 - 0.08}{0.12 - 0.08} = 5.175A$

所以负载电流至少 5.175A

17-10. 解：

（1）$I_{st} = \dfrac{U_N}{r_a} = \dfrac{220}{0.51} = 431.37A$

(2) $I_N = \dfrac{P_N}{0.8U_N} = 12.5A$

$$R_1=\frac{U_N}{I_{st1}}=\frac{220}{2\times 12.5}=8.8\Omega$$

$$R_2=\frac{1.2}{2}R_1=5.28\Omega$$

$$R_3=\frac{1.2}{2}R_2=3.168\Omega$$

$$R_4=\frac{1.2}{2}R_3=1.901\Omega$$

$$R_5=\frac{1.2}{2}R_4=1.141\Omega$$

$$R_6=\frac{1.2}{2}R_5=0.685\Omega$$

$R_7=\frac{1.2}{2}R_6<r_a$所以起动变阻器应分成 6 级，各级电阻如下：

第一级电阻$R_1-R_2=3.52\Omega$

第二级电阻$R_2-R_3=2.112\Omega$

第三级电阻$R_3-R_4=1.267\Omega$

第四级电阻$R_4-R_5=0.76\Omega$

第五级电阻$R_5-R_6=0.456\Omega$

第六级电阻$R_6-r_a=0.175\Omega$